

高浜3・4号と大飯3・4号の基準地震動は過小評価されている

2015年10月1日

大阪府立大学名誉教授

長沢 啓行

[要旨]

関西電力の高浜原発3・4号では2015年4月14日、福井地裁が運転差止仮処分命令を決定し、九州電力の川内1・2号では同年4月22日、鹿児島地裁が運転差止仮処分申請を却下した。高浜決定は、「具体的危険性が万が一でもあれば差し止めが認められる」とした大飯3・4号運転差止判決（2014年5月21日）を受け継ぎ、基準地震動の過小評価を第一の問題点として指摘した。川内決定においても、「基準地震動は、原子力発電所の敷地において今後発生し得る最大の地震を想定して策定すべき」としており、「策定された基準地震動が十分保守的であるかどうか」が最大の争点になっている。

そこで、本意見書では、高浜3・4号および大飯3・4号のいずれの基準地震動においても、最新の知見が十分反映されておらず、保守性（安全余裕）を十分持たせたものになっていないことを示す。基準地震動は「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」で構成されるため、それについて次の点を明らかにした。

(1) 「震源を特定せず策定する地震動」として、「2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」が採用されている。ところが、この留萌支庁南部地震においては、地震計の設置不足を補うため、地域地盤環境研究所が震源断層モデルを用いて地震観測点以外の震源域内での地震動を再現解析しており、その最大値は地震観測記録の1.8倍になる。これを考慮すれば、留萌支庁南部地震を考慮した地震動は1,100ガル程度になり、高浜3・4号のクリフエッジ973ガルを超える。さらに、原子力安全基盤機構（現在は原子力規制庁）は国内の地震観測記録を反映した独自の断層モデルによる地震動解析を行い、M6.5の横ずれ断層で1,340ガルの地震動が起こることを明らかにしている。これを採用すれば、高浜3・4号だけでなく、大飯3・4号のクリフエッジ1,260ガルをも超える。

(2) 「震源を特定して策定する地震動」は、基本的に「FO-A～FO-B～熊川断層」の地震動評価に基づいている。高浜3・4号で700ガルの基準地震動Ss-1を規定しているのは耐専スペクトルによる地震動評価だが、最近20年間の震源近傍での地震観測記録は反映されておらず、現在見直し作業中

であり、改定後の耐専スペクトルを用いるべきである。また、耐専スペクトルは平均的な応答スペクトルにすぎず、地域差以外の偶然変動によるバラツキをも考慮すれば、少なくとも2倍の余裕を持たせるべきである。そうすれば1,300ガル以上になり、クリフエッジを超える。高浜3・4号における断層モデルによる評価は耐専スペクトルによる評価の1/2以下と小さく、明らかに過小評価であり、断層モデルの欠陥を示唆している。

大飯3・4号では、断層との距離が近すぎるという理由で耐専スペクトルは適用されていないが、関西電力の示した耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係図から1,200ガル以上になる。また、大飯3・4号と高浜3・4号の断層モデルによる地震動評価には2倍の差があり、大飯3・4号で耐専スペクトルが適用されれば、高浜3・4号における700ガル弱の2倍になって当然であり、「適用外」とする根拠に乏しいことを示唆している。さらに、耐専スペクトルにおける偶然変動などの少なくとも2倍のバラツキを考慮すれば2,400ガル以上になる可能性もある。これは、原子力安全基盤機構の独自の断層モデルによる地震動解析結果とも一致しており、2008年岩手・宮城内陸地震の地中地震計による1,078ガル（3成分合成、基準地震動と同じ解放基盤表面はぎとり波相当で2,000ガル）の地震観測記録等とも整合している。

つまり、「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」のいずれにおいても地震動が過小評価されており、最新の知見に基づいて基準地震動を保守的に設定し直せば、高浜3・4号と大飯3・4号のいずれにおいてもクリフエッジを超えることは避けられない。

1 はじめに

関西電力の高浜原発3・4号では2015年4月14日、福井地裁が運転差止仮処分命令を決定し[42]、九州電力の川内1・2号では2015年4月22日、鹿児島地裁が運転差止仮処分申請を却下した[43]。福井地裁の決定は、2014年5月21日の大飯3・4号運転差止判決[44]と同様に、「具体的危険性が万が一でもあれば差し止めが認められる」(主文[44]pp.40-41, 主文[42]p.45)という観点から、「本件原発の安全施設、安全技術には多方面にわたる脆弱性がある」と具体的に指摘し、「①基準地震動の策定基準を見直し、基準地震動を大幅に引き上げ、それに応じた根本的な耐震工事を実施する」(主文[42]p.44)ことを第一に求めている。仮処分申請を却下した川内決定においても、「新規制基準の趣旨に照らせば、基準地震動は、原子力発電所の敷地において今後発生し得る最大の地震を想定して策定すべきものであると解される。」(主文[43]pp.127-128)としており、「策定された基準地震動が十分保守的であるかどうか」が最大の争点になっていると言える。

そこで、本意見書では、高浜3・4号および大飯3・4号のいずれの基準地震動においても、最新の知見が十分反映されておらず、保守性(安全余裕)を十分持たせたものになっていないことを理論的かつ具体的に示す。

基準地震動は、「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」の2種類で構成されるため、それぞれについて検討する。前者は、地表の活断層を詳細に調査し、地下の震源断層を特定して地震動評価を行うものであり、耐専スペクトルや距離減衰式などを用いた「応答スペクトルによる方法」と、震源断層モデルによるコンピュータ・シミュレーションである「断層モデルによる方法」の2種類の手法で行われる。後者は、詳細な活断層調査を行っても事前には予知できない震源断層による地震動の評価を行うものであり、16の地震観測記録の採否をサイトごとに検討するものとされている。

以下では、わかりやすさの観点から、まず「震源を特定せず策定する地震動」を取り上げ、「2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」に

ついて、地震計による地震観測記録の時間的・空間的な不足を「再現された震源断層モデル」による地震動解析で補えば、1.8倍の1,100ガル程度になり、高浜3・4号のクリフエッジ973ガルを超えることを示す。さらに、国内の地震観測記録を反映した原子力安全基盤機構による独自の断層モデルによれば、M6.5の横ずれ断層で1,340ガルの地震動が起こると解析されており、これを採用すれば、高浜3・4号のクリフエッジだけでなく大飯3・4号のクリフエッジ1,260ガルをも超えることを示す。

次に、「震源を特定して策定する地震動」を取り上げ、高浜3・4号では「FO-A～FO-B～熊川断層」の耐専スペクトルが基準地震動を規定していること、しかし、耐専スペクトルには最近20年間の震源近傍での地震観測記録は反映されておらず、現在見直し作業中であり、改定後の耐専スペクトルを用いるべきであること、また、耐専スペクトルは平均的な応答スペクトルにすぎず、地域差以外の偶然変動によるバラツキをも考慮すれば少なくとも2倍の余裕を持たせ、1,300ガル以上へ引上げるべきであることを示す。

また、高浜3・4号における断層モデルによる評価は耐専スペクトルによる評価の1/2以下と小さく、明らかに過小評価であり、断層モデルの欠陥を示唆していることを示し、理論的にも裏付ける。

大飯3・4号においては、断層との距離が近すぎるという理由で耐専スペクトルは適用されていないが、関西電力の示した耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係図から1,200ガル以上になることを示し、大飯3・4号と高浜3・4号の断層モデルによる地震動評価に2倍の差があることから耐専スペクトルも高浜3・4号における700ガル弱のほぼ2倍の1,200ガル以上になって当然であることを示す。さらに、耐専スペクトルにおける少なくとも2倍の偶然変動などのバラツキを考慮すれば2,400ガル以上になる可能性があること、しかも、これらは地震観測記録など最新の知見にも合致することを指摘する。

以上より、最新の知見に基づき基準地震動の過小評価を改めれば、高浜3・4号と大飯3・4号のいずれにおいてもクリフエッジを超えることは避けられないことを指摘する。

2 震源を特定せず策定する地震動

関西電力は高浜・大飯・美浜原発の基準地震動を過小評価し続けてきた。表1のように、原子炉設置許可時の基準地震動はそれぞれ370ガル、405ガル、405ガルにすぎなかった。1995年の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災の惨禍を受けて原子力安全委員会の耐震設計審査指針の見直しが進み、2006年の指針改定では原子力ムラにだけ通用していた独善的な活断層評価手法はことごとく退けられた。その結果、活断層は図1のように一挙に数が増え、それが長くなり、運動も考慮され、2008年のバックチェック中間報告、2010年の原子力安全・保安院報告、2013年以降の原子力規制委員会審議と、検討を経るにつれ、基準地震動が引上げられていった。高浜3・4号では、370ガルから700ガルへ1.9倍、大飯3・4では405ガルから700ガル(856ガルの地震波追加)へ1.7倍になった。

しかし、活断層評価手法は改善されたものの、地震動評価手法が古いままであったり、地震動を過小算定する方法がそのまま用いられたり、せっかく得られた地震観測記録や地震動解析結果など最新の知見が生かされなかったり、問題だらけである。原子力規制委員会・原子力規制庁は、市民との話合いの中で地震動過小評価の問題点を色々指摘され、それを部分的に認めながら、改めようとしていない[46, 47, 48, 49, 50]。ところが、原子力規制委員会の委員長代理として地震動評価の審議を担ってきた島崎邦彦氏は、任期切れで退職して8ヶ月後の2015年5月の学会で、今の断層モデルのレシピでは地震動が過小評価されることを自ら発表し、批判している[36]。自らが審査の中で認めた地震動評価手法を自ら批判せざるを得なかつたのは、学者としての良心の現われであろう。行政の責任ある立場にあっては「当然のことを当然のごとくには主張できない」という相当のプレッシャーがあったのではないかと推測されるが、これが原子力規制委員会での審査会合の現実なのである。「行政による瑕疵の有無」を判断すべき司法はこの事実を良く認識しておくべきではなかろうか。

2015年9月現在、原子力規制委員会の審査会合で了承された高浜3・4号の基準地震動Ss-1~7は図

2と表2、大飯3・4号の基準地震動Ss-1~19は図3と表3の通りである。図2と図3には黒点線でそれぞれのクリフェッジ(炉心溶融事故に至るギリギリの地震動、表1参照)を加筆している。また、図中の赤い波線は、後述する原子力安全基盤機構JNESによるM6.5の横ずれ断層の地震動(震源域内応答スペクトルの最大値の包絡線)である。

「震源を特定せず策定する地震動」は、古くは「M6.5の直下地震」が全国一律に採用されていたが、2006年指針改定で地震観測記録に基づく加藤ら(2004)[23]の「上限レベル」の応答スペクトルに変更され、原子力規制委員会による2013年以降の新規制基準の下では、震源を特定しにくい16の国内地震観測記録についてサイトごとに採用するかどうかを検討することになった。その結果、高浜3・4号と大飯3・4では、いずれも、表2と表3に示される「2000年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録」と「2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」が採用されている。

しかし、ここには2つの大きな問題点がある。第1に、震源近傍での地震観測記録がそれ始めたのは、1995年阪神・淡路大震災を機に地震観測網が張り巡らされて以降のことであり、16の地震観測記録は1996~2013年の20年足らずに取れたものにすぎず、データが揃うには今後何十年もかかる。サイトごとの地域性に見合った場所で地震が起きるとは限らず、地震が起きても震源域内に地震計があるとは限らない。「地震観測記録が新たにとれれば採用する」という悠長な姿勢では、「震源を特定せず策定する地震動」を保守的に考慮したとは到底言えない。

第2に、地震観測記録の不足を補う上で信頼性の高い地震動解析手法が開発されてきているにもかかわらず、その成果が全く生かされていない。この点で、地域地盤環境研究所[3]と原子力安全基盤機構JNES[9]による地震動解析結果が重要となる。

地域地盤環境研究所は北海道留萌支庁南部地震の再現モデルを構築し、これをそのまま用いて、断層最短距離15km以内の仮想地表観測点での地震動を解析した。これは地震計の設置不足を補う解析と言える。この地震ではHKD020地点(図4の△)の地表地震計で1,127ガル(EW方向), 536ガ

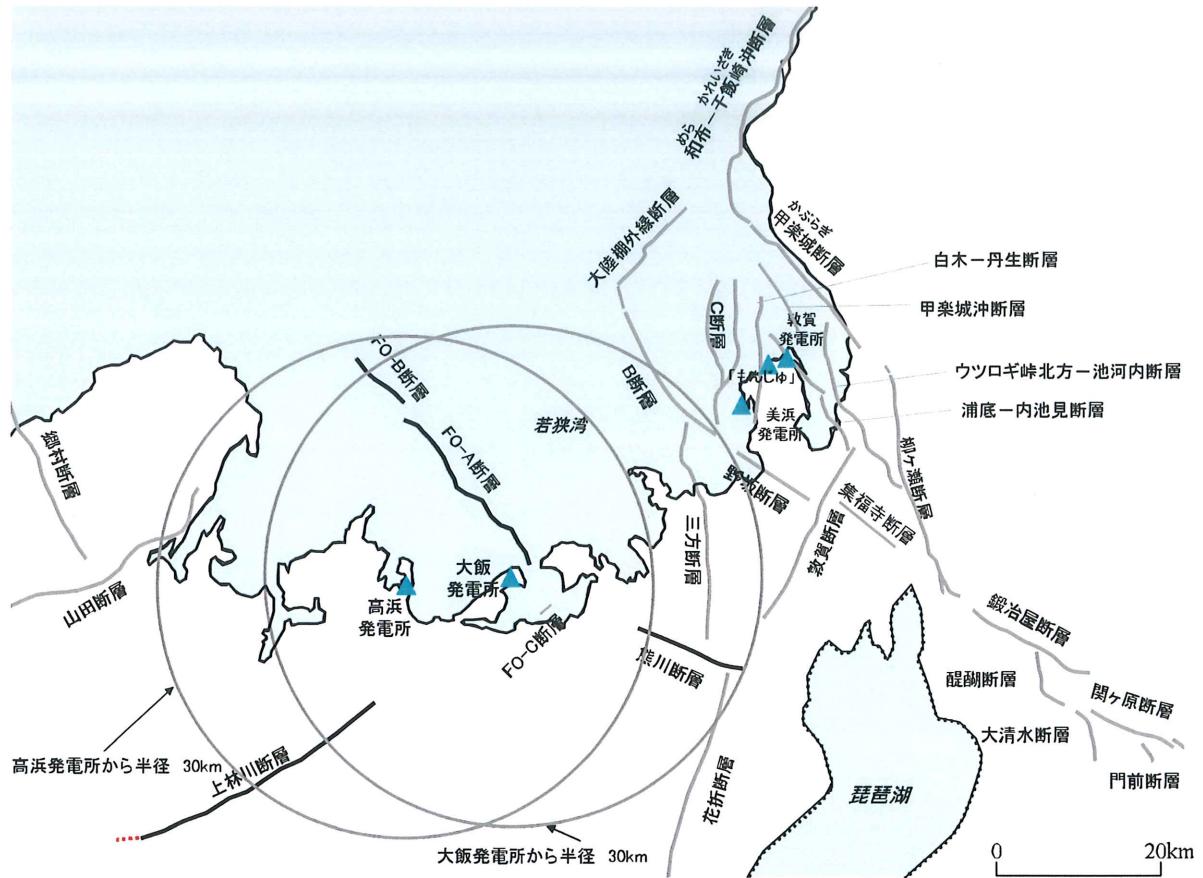


図 1: 若狭湾周辺と大飯・高浜原発 30km 圏の活断層群 [26]

表 1: 各原発の解放基盤表面位置、せん断波速度および基準地震動の水平動(鉛直動)の最大加速度の推移

原発名	解放基盤表面位置, S 波速度 EL., V_s (注 1)	設置許可時 限界地震の 基準地震動 S_2	2008 年 3 月 中間報告 基準地震動 S_s	2010 年原子力 安全・保安院 報告 S_s (注 2)	クリフィエッジ [炉心溶融事故] αS_s (注 3)	2015 年 9 月 原子力規制委員会 審議会 S_s (注 4)
もんじゅ	+8.5m, 1900m/s	466 gal	600 (400) gal	760 (507) gal	未評価	未申請
敦賀原発	-10m, 1600m/s	532 gal	650 (433) gal	800 (533) gal	1.77Ss(1,420)	未申請
美浜原発	-10m, 1650m/s	405 gal	600 (400) gal	750 (500) gal	1.76Ss(1,320)	750(500), 993
大飯原発	+3.9m, 2240m/s	405 gal	600 (400) gal	700 (467) gal	1.80Ss(1,260)	700(468), 856
高浜原発	+1.0m, 2240m/s	370 gal	550 (367) gal	550 (367) gal	1.77Ss(973)	700 (467)

注 1 : 美浜は 1 号 EL.-14.0m, 2 号 EL.-15.5m, 3 号 EL.+1.0m の平均, 大飯は 1-2 号 EL.+3.9m, 3-4 号 EL.+6.0m の平均, 高浜は 1-2 号 EL.+1.0m, 3-4 号 EL.+1.5m の平均である (EL : 標高) ($gal = cm/s^2$)

注 2 : 2010 年に原子力安全・保安院報告が出されたのは, もんじゅ (3 月 15 日に最終報告), 美浜 1 号, 大飯 3-4 号および高浜 3-4 号 (11 月 29 日に中間報告への評価結果のみ) であり, 敦賀原発については 2009 年 11 月段階で審議中のままに留まっている。2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による福島第一原発事故の後のストレステストではこれらの基準地震動をベースにクリフィエッジが評価されている。Ss の最大加速度は「水平方向(鉛直方向)」で記載している。

注 3 : クリフィエッジとは地震動が基準地震動 S_s の何倍を超えると炉心溶融事故に至るかを示すもので, αS_s で表し, その最大加速度 (S_s の最大加速度の α 倍: 水平方向) を括弧内に記載。大飯 3-4 号ではストレステスト(一次評価)評価結果が 2012.2.13 に原子力安全・保安院から出ており, 1.80Ss と評価されている。その 7ヶ月後の 2012.9.3 に高浜 3-4 号の評価結果が出て, 1.77Ss とされている。原子力安全・保安院によって評価結果が出ているのは, 伊方 3 号 (2012.3.26) の 1.5Ss(855gal), 川内 1-2 号 (2012.9.3) の 1 号 1.86Ss(1,004gal), 2 号 1.89Ss(1,020gal), 泊 1-2 号 (2012.9.3) の 1.86Ss(1,023gal) の計 9 基だけである。美浜原発では 3 号について関西電力の一次評価結果 (2011.12.21) で 1.76Ss, 敦賀原発では 2 号について日本原子力発電の一次評価結果 (2012.4.19) で 1.77Ss であり, これらについては原子力安全・保安院が「評価中」の段階で解散している。ちなみに, 原子力安全・保安院の評価結果の出た 9 基のうち原子力安全委員会の確認を終了したのは大飯 3-4 号だけであり, 伊方 3 号が 2012.3.26 に原子力安全委員会へ報告されたに留まり, 他の 6 基は報告すらされていない。

注 4 : FO-A～FO-B～熊川断層の地震動評価において, 高浜原発では耐専スペクトルが基準地震動を超えたため, 水平 700(鉛直 467)gal へ引き上げた。大飯原発では耐専スペクトルが適用外になり, S_s -1 はそのままだが, 断層モデルによる地震動評価で 856 ガル (EW 方向) になった(基準地震動に追加)。美浜 3 号では, 大陸棚外縁～B～野坂断層の耐専スペクトルが適用外で S_s -1 は変わらず, 断層モデルによる C 断層の地震動評価結果が 993 ガルになった(基準地震動に追加)。

表 2: 高浜 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s² と同じ) [27]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動（耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成）				
Ss-1	設計用模擬地震波 (FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (傾斜角 75 度ケース) の耐専スペクトルによる)	700	467	
震源を特定して策定する地震動（「断層モデルによる方法」で作成）				
Ss-2	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 5)	376	248	334
Ss-3	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 6)	396	240	313
Ss-4	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 ($V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 9)	255	205	218
Ss-5	上林川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 3)	180	374	320
震源を特定せず策定する地震動（地震観測記録等に基づいて作成）				
Ss-6	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-7	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620	320	

表 3: 大飯 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s² と同じ) [28]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動（距離減衰式など「応答スペクトルによる方法」で作成）				
Ss-1	設計用模擬地震波 (FO-A～FO-B 断層～熊川断層の耐専スペクトル は適用外であり、距離減衰式による地震動評価に基づく)	700	468 *1	
震源を特定して策定する地震動（「断層モデルによる方法」で作成）				
Ss-2	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 1)	690	776	583
Ss-3	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 2)	496	826	383
Ss-4	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 3)	546	856	518
Ss-5	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 4)	511	653	451
Ss-6	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 5)	660	578	450
Ss-7	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 8)	442	745	373
Ss-8	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (傾斜角 75 度ケース, 破壊開始点 1)	434	555	349
Ss-9	FO-A～FO-B 断層～熊川断層 (すべり角 30 度ケース, 破壊開始点 3)	489	595	291
Ss-10	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 1)	511	762	361
Ss-11	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 3)	658	727	469
Ss-12	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 4)	495	546	334
Ss-13	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 5)	744	694	380
Ss-14	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 6)	723	630	613
Ss-15	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 7)	685	728	430
Ss-16	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 8)	677	753	391
Ss-17	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 9)	594	607	436
震源を特定せず策定する地震動（地震観測記録等に基づいて作成）				
Ss-18	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-19	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620	320	

*1: 基準地震動の応答スペクトルでは 467gal (周期 0.02 秒の応答加速度) だが、これに適合するように作成した模擬地震波の最大加速度は 468gal になるため、関西電力は 468 ガルを Ss-1 の模擬地震波の最大加速度として記載している。

表 2 と表 3 を比較して明らかのように、基準地震動 Ss-1 はいずれも同じだが、大飯 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2～17 は高浜 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2～4 の 2 倍以上である。同じ「FO-A～FO-B 断層～熊川断層」に対する評価でありながら、このように大きいのは、断層との等価震源距離が高浜 3・4 号の 18.6km に対し、大飯 3・4 号は 11.0km と非常に近いからである。だとすれば、応答スペクトルによる基準地震動 Ss-1 が大飯 3・4 号では 2 倍以上にも大きく設定されて当然である。しかし、そうなっていないのは、断層との等価震源距離が「極近距離」より近すぎると耐専スペクトルの適用範囲外になるという理由からだが、震源近傍の地震観測記録はここ 20 年でかなり多く取れだしておらず、これらに基づいて耐専スペクトルを抜本的に作り替えて適用すべきである。ちなみに、原子力規制庁によれば、日本電気協会で耐専スペクトルを現在見直し作業中のことである。そうであればなおさら、参考値としても耐専スペクトルを求め、大飯 3・4 号の基準地震動 Ss-1 を大幅に引上げるべきである。その上で、バラツキを考慮すべきである。

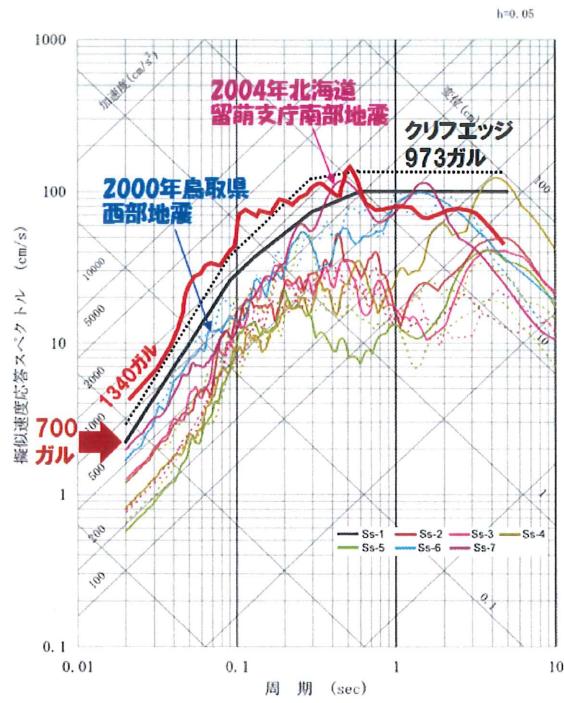


図2: 高浜3・4号の基準地震動Ssとクリフエッジ(黒点線)およびJNESによる1340ガルの地震動(赤波線)(水平NS方向)(2014年8月)[27]

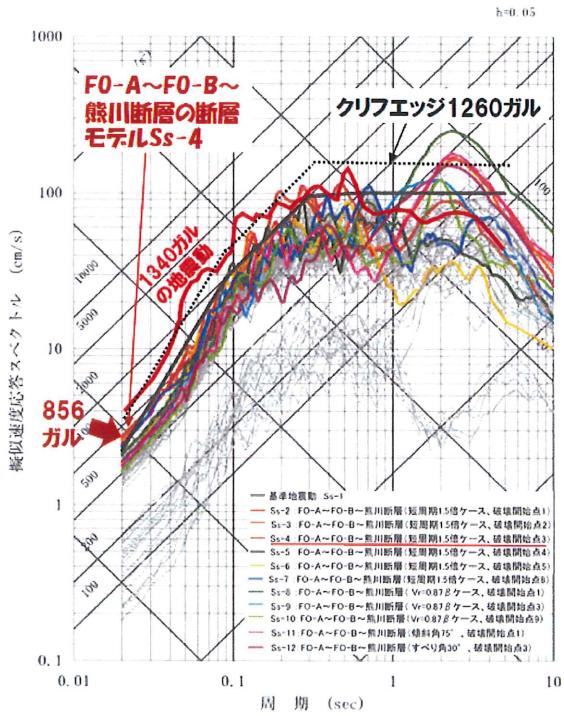


図3: 大飯3・4号の基準地震動Ssとクリフエッジ(黒点線)およびJNESによる1340ガルの地震動(赤波線)(水平EW方向)(2015年3月)[28]

ル(NS方向)の地震動が観測されているが、図4のように他の仮想観測点では約1,300ガル(EW)、約1,700ガル(NS)の地震動が解析されている。また、

震源断層モデルをそのまま使って、破壊開始点やすべり角など破壊の不確かさを補う解析も行っている。その結果、アスペリティ下端中央から破壊が始まった場合には、図5のように約2,000ガル(EW)、約1,050ガル(NS)の地震動が起こるとの解析結果が出されている。これらは仮想地表観測点での地震動評価結果であるため、解放基盤表面はぎとり波に換算しなければならないが、単純に比例計算すれば、620ガルのSs-7(高浜)とSs-19(大飯)が1.8倍(EW方向の倍率)の1,100ガルになりうる。これは高浜3・4号のクリフエッジ973ガルを超えている。このような実際の地震観測記録に基づく再現解析は現実の地震動を再現できることから、地震計の設置数の限界をカバーするものとして積極的に取り入れるべきである。

他方、原子力安全基盤機構JNESは、国内の地震データに基づいて独自の断層モデルを構築し、表1に示される原発の解放基盤表面より堅い地震基盤表面(S波速度Vs = 2600m/s、図6参照)に観測点を置き、地震観測記録の不足を地震動解析で補っている。その結果、M6.5の横ずれ断層による地震が起こると、図7のように震源近傍で1,340ガルの地震動が生じることを明らかにした[9]。図8の震源近傍での応答スペクトルを包絡する曲線が図9であり、図2および図3の赤波線である。これらの図で明らかなように、1,340ガルの地震動は原発にとって重要な周期帯(0.03~0.5秒)(巻末注1)の大半でクリフエッジを越えている。

ちなみに、M6.5の地震は地表に地震断層が現れないため、いくら詳細な調査を行っても発見できず、どこででも起こりうる小さな地震である。そのため、かつては「M6.5の直下地震」が全原発に共通の限界地震として採用されていたのだが、その地震動は、「震央域外縁距離(M6.5で7.1km, M7で10km, M8で25km)の圏内ではカットされて一定になる」という非現実的な都合よい仮定によって過小評価されていた[45]。JNESの地震動解析結果は、「関西電力が設定し原子力規制委員会の承認した基準地震動は余りに過小すぎ、M6.5の小さな地震でクリフエッジを超える大きな地震動が発生する」という重大な事実を述べ、警告しているのである。そうである以上、かつての「M6.5の直

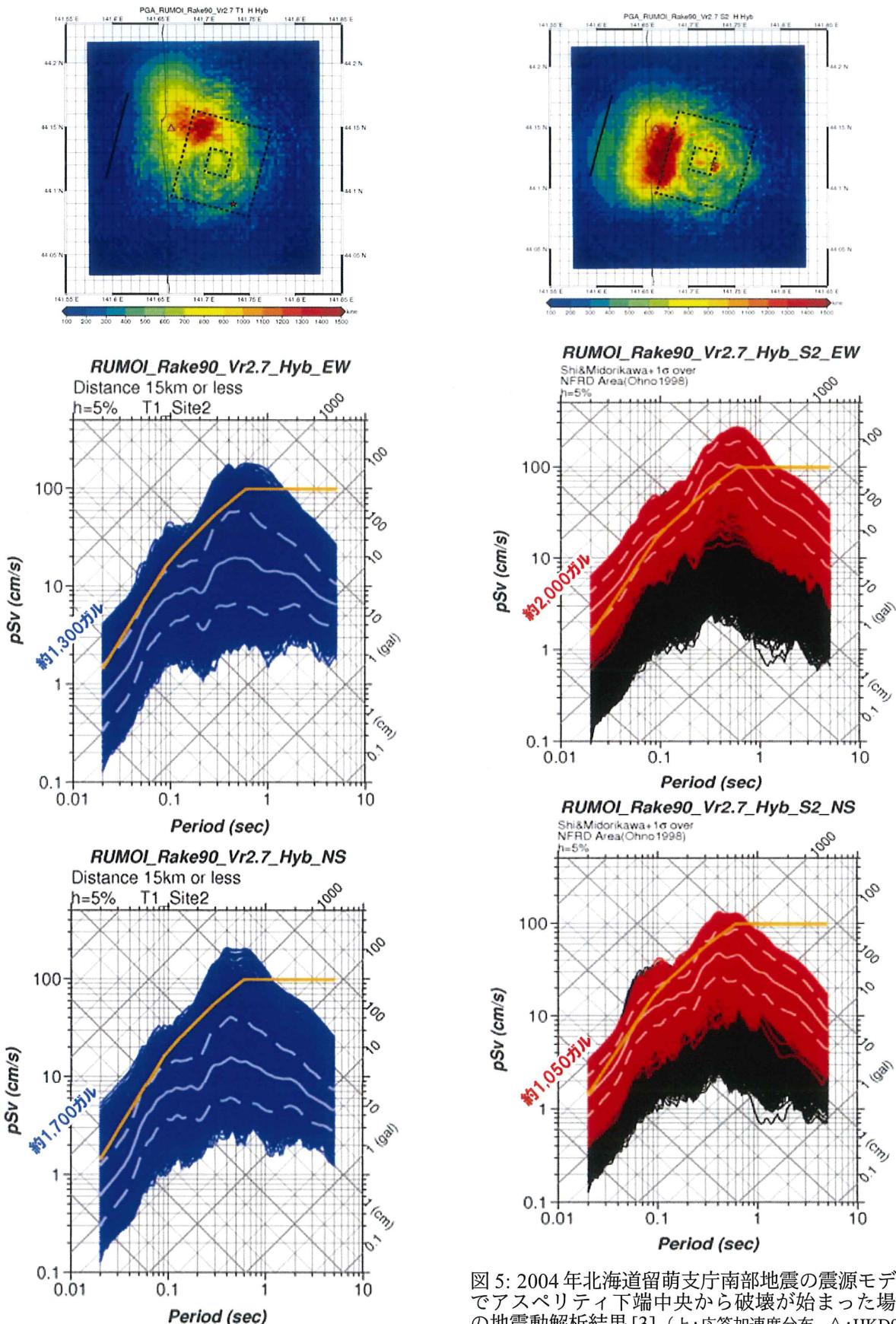


図 4: 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルによる震源近傍の地震動解析結果 [3] (上: 応答加速度分布, △: HKD020 地点, ☆: 破壊開始点; 中: 断層最短距離 15km 以内の応答スペクトルの重ね書きで EW 方向, 白線: 平均, 白破線: ± 標準偏差; 下: NS 方向,)

図 5: 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルでアスペリティ下端中央から破壊が始まった場合の地震動解析結果 [3] (上: 応答加速度分布, △: HKD020 地点, ☆: 破壊開始点; 中: 断層最短距離 15km 以内の応答スペクトルの重ね書きで EW 方向, 赤実線: NFRD 効果を含む領域内の重ね書き, 白線: 赤実線領域内の平均, 白破線: 同土標準偏差; 下: NS 方向,)

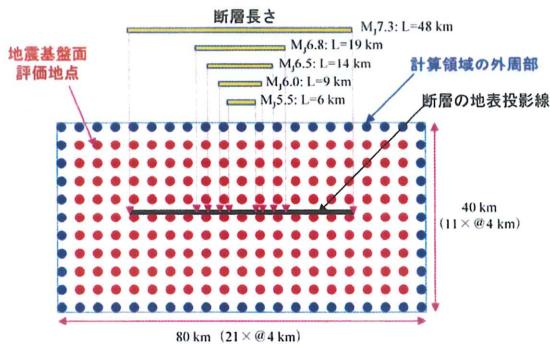
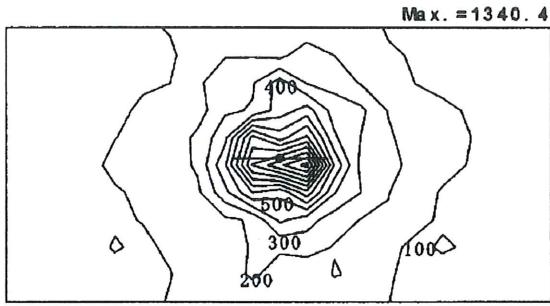
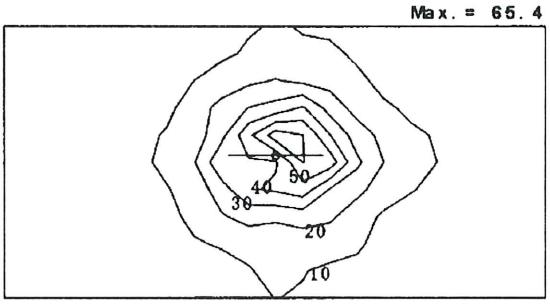


図 6: JNES による対象計算領域（地震基盤上の評価点：縦 11× 横 21 の格子点 231）と横ずれ断層の例 [9]



(a) 加速度分布図 (最大値 1340.4cm/s^2)



(b) 速度分布図 (最大値 65.4cm/s)

図 7: 横ずれ断層モデルによる地震動評価結果 (M6.5)[9] (地震発生層 2~20km, 断層・アスペリティ上端 2km, 実効応力大, 高周波遮断特性平均 + σ)

下地震」の過小評価を繰り返さないためにも、これを「震源を特定せず策定する地震動」として基準地震動に加えるべきである。

この問題については、原子力規制委員会・原子力規制庁と市民団体との話し合いが昨年 7 月と今年 1 月の 2 度もたれ [49, 50]、規制庁は最終的に「専門家を入れて断層モデルの妥当性について検討すべきだ」と認めている。にもかかわらず、規制庁はこれをサボタージュしたまま、川内 1・2 号、高浜 3・4 号および伊方 3 号の審査書（再稼働認可）を出している。これで果たして、川内決定が主張

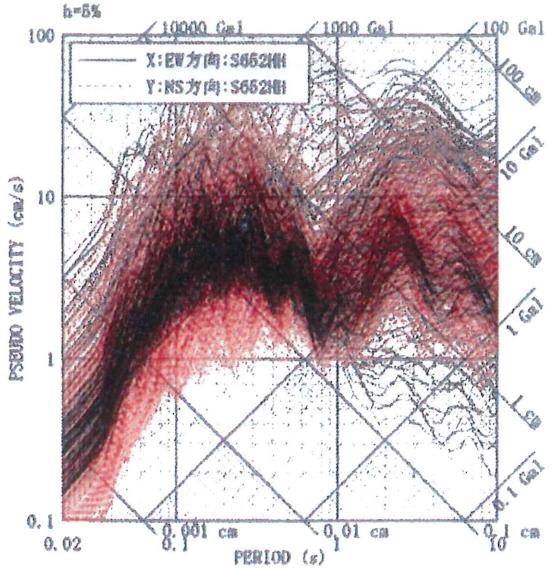


図 8: 横ずれ断層 (M6.5) の地震動評価結果 [9] (断層上端 2km, アスペリティの上端 2km, 実効応力大 (19.1MPa), 高周波遮断特性平均 + σ ($f_{\max} = 11.9 \text{Hz}$) のケース)

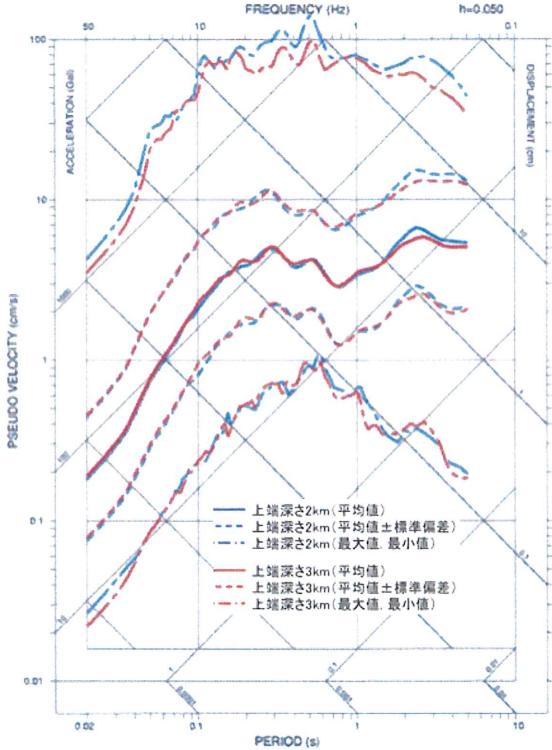


図 9: 横ずれ断層モデル (M6.5) による地震動評価結果 [9] (断層上端 2km(3km), アスペリティの上端 2km(3km), 実効応力大 (19.1MPa), 高周波遮断特性平均 + σ ($f_{\max} = 11.9 \text{Hz}$) のケース)

するように「基準地震動は、原子力発電所の敷地において今後発生し得る最大の地震を想定して策定」されていると言えるであろうか。

地震観測記録の時間的・空間的制約を乗り越えるためには、このような地震動解析結果を利用するものが重要だと言える。ここまで踏み込まなければ

ば、3・11のフクシマ事故を教訓としたことにはならず、15.7mの津波が来る可能性を試算しながら無視した東京電力および貞観津波の危険性を検討すべきだと申し出た部下を恫喝して黙らせ、東京電力の過小評価を容認した原子力安全・保安院の過ち[50]を繰り返すことになるであろう。

3 震源を特定して策定する地震動

3.1 耐専スペクトルでは適用範囲が狭められ偶然変動のバラツキが無視されている

「震源を特定して策定する地震動」は、耐専スペクトル等による「応答スペクトルによる方法」と「断層モデルによる方法」があり、いずれにおいても地震動が過小評価されている。まず、前者の耐専スペクトルについて述べる。

耐専スペクトルは、国内地震観測記録に基づくものだが、震源近傍での大きな地震観測記録を含む最近20年間の最新データが反映されておらず、原子力規制庁によれば、日本電気協会で現在見直し作業中である。これが改定されれば、最新データを反映させる限りにおいて、近距離地震ではより大きな地震動評価に見直されることは必至である。また、耐専スペクトルは地震動の平均像を与えるものであり、地震動を過小評価しないために地域性や偶然変動のバラツキを考慮する必要がある。

これらの問題点は、基準地震動の多くが耐専スペクトルによって規定されているという事実からみて、極めて重要であり、これらに十分配慮した地震動評価が不可欠である。

たとえば、高浜3・4号の基準地震動は、「FO-A～FO-B～熊川断層」(63.4km, M7.8, 図10参照)に対する耐専スペクトルが、図11のように旧Ss-1(550ガル)を超えたため、新Ss-1(700ガル)へ引上げられた¹。

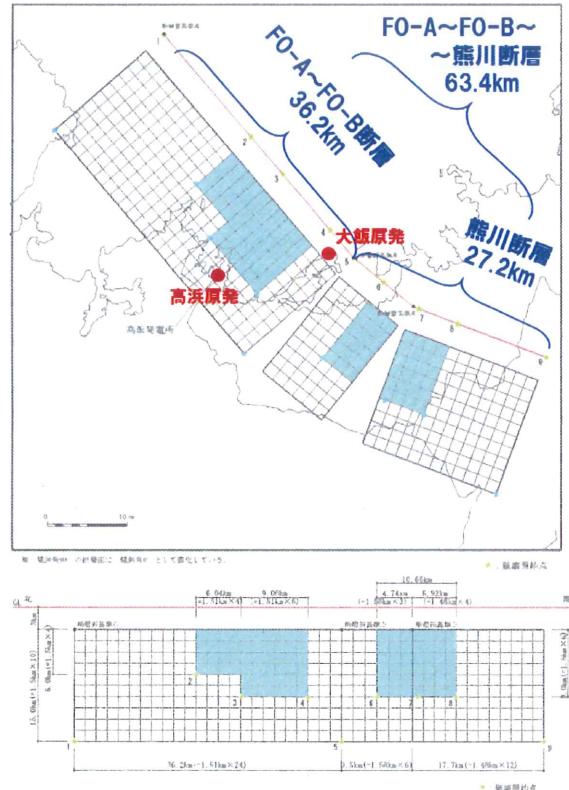


図10: 高浜3・4号と大飯3・4号におけるFO-A～FO-B～熊川断層の断層モデル（上端深さ3kmの基本ケース）[27, 28]

しかし、大飯3・4号では、同じ「FO-A～FO-B～熊川断層」に対して耐専スペクトルは適用範囲外とされ、算出されていない。その結果、Ss-1は古いままである。関西電力は、その理由を「極近距離との乖離が大きい」と説明する[25]。確かに、図14に示すとおり、等価震源距離 X_{eq} は、高浜3・4号で18.6kmだが、大飯3・4号では11.0kmと小さく、極近距離より乖離している。しかし、大飯3・4号の基準地震動Ss-18として採用されている「鳥取県西部地震(M7.3)・賀祥ダムの記録」は、等価震源距離が6kmと非常に小さく、極近距離からの乖離が大きいにもかかわらず、原子力安全委員会の意見交換会では図16を検討して「耐専スペクトルはまあまあ使える」と判断されている[41](巻末注2)。つまり、「極近距離からの乖離が大きい」というのは理由にならず、本来なら同等の地震観測記録と照合して、その適用可能性を説明すべきである。この点では、最近約20年間の震源近傍を含むM7クラスの強震観測記録に基づき耐専スペクトルそのものを改定すべきであり、日本電

¹耐専スペクトルの鉛直成分は周期約0.1sec以下で水平成分の約0.6倍になっているため、Ss-1Hの2/3で作成されている鉛直基準地震動Ss-1V(367ガル)に対し、図12のように「基本ケース」等では下回り、「傾斜角75度のケース」でほぼ重なる程度である。しかし、Ss-1VはSs-1Hの2/3となるように作成されているため、こちらも467ガルへ引き上げられた。

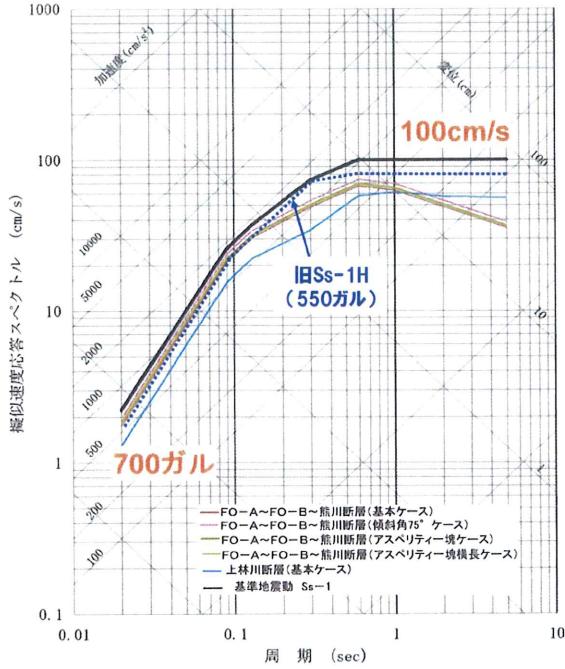


図 11: 高浜原発における FO-A～FO-B～熊川断層(断層上端深さ 3km)の耐専スペクトルと新・旧基準地震動 Ss-1H(水平方向)[27]

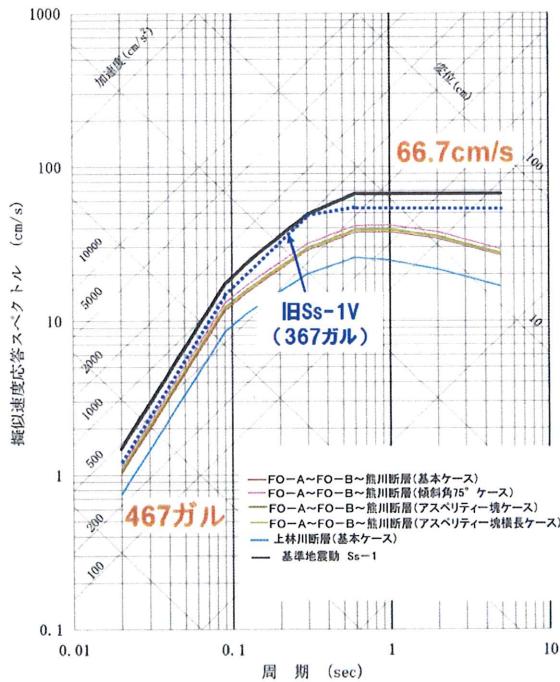


図 12: 高浜原発における FO-A～FO-B～熊川断層(断層上端深さ 3km)の耐専スペクトルと新・旧基準地震動 Ss-1V(鉛直方向)[27]

気協会で現在見直し中の知見を反映させるべきである。

さらに、関西電力は、極近距離からそれほど乖離していない「FO-A～FO-B 断層」($M7.4, X_{eq} =$

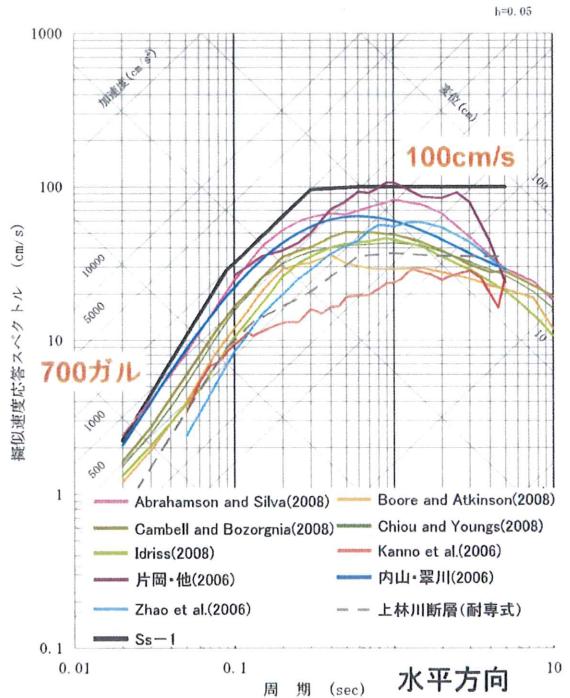


図 13: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層の距離減衰式による応答スペクトル、上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1 の比較(水平方向)(2015 年 3 月)[28]

10.5km, 図 14 参照)についても、大飯 3・4 号に対し、同じ理由で耐専スペクトルを適用していない。

関西電力がこれらのケースについて耐専スペクトルを適用したくない理由は、「極近距離の線から乖離している」からではなく「地震動が大きくなりすぎる」からである。関西電力の示した図 15 で読み取れば、「FO-A～FO-B 断層 ($M7.4, X_{eq} = 10.5$ km)」で 800 ガル以上、「FO-A～FO-B～熊川断層 ($M7.8, X_{eq} = 11.0$ km)」で 1200 ガル以上になる。いずれの場合も、700 ガルの基準地震動 Ss-1H を大きく超え、後者では大飯 3・4 号のクリフェッジ 1,260 ガルを超える可能性すらある。

ちなみに、関西電力は耐専スペクトルの代わりに距離減衰式による応答スペクトルを図 13 のように求めているが、一部の周期を除いて、ほとんど全周期にわたって Ss-1 以下である。また、高浜 3・4 号における図 11 の耐専スペクトルは大飯 3・4 号の Ss-1 にも極めて接近しており、これと比べても、距離減衰式による地震動評価は小さく、過小評価だと言える。耐専スペクトルは、図 15 のように、等価震源距離が高浜 3・4 号の 18.6km から大飯 3・4 号の 11.0km まで小さくなれば、それに伴って

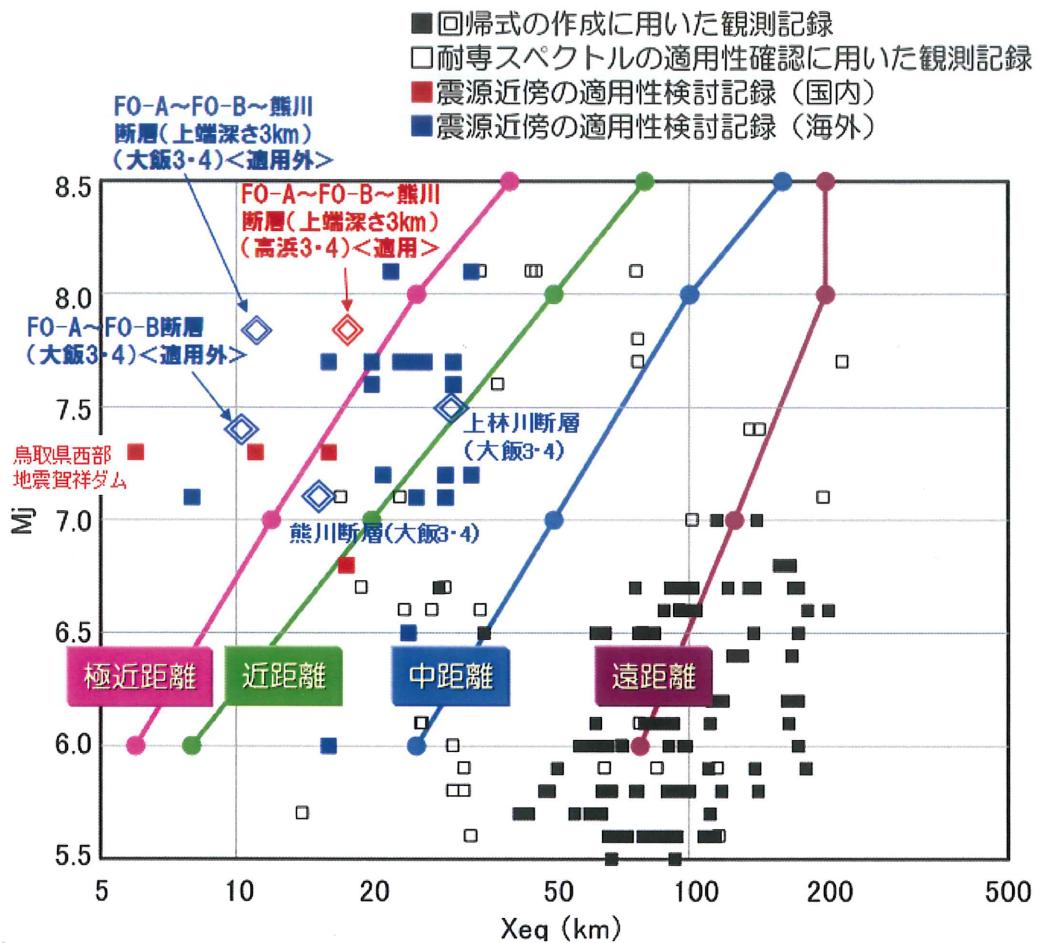


図 14: 耐専スペクトルの作成・適用性確認に用いられた地震データの等価震源距離 X_{eq} と気象庁マグニチュード M (図中は M_j と表記) [41] (大飯 3・4 号と高浜 3・4 号に関するデータ [27, 28] を二重線の菱形で加筆した)

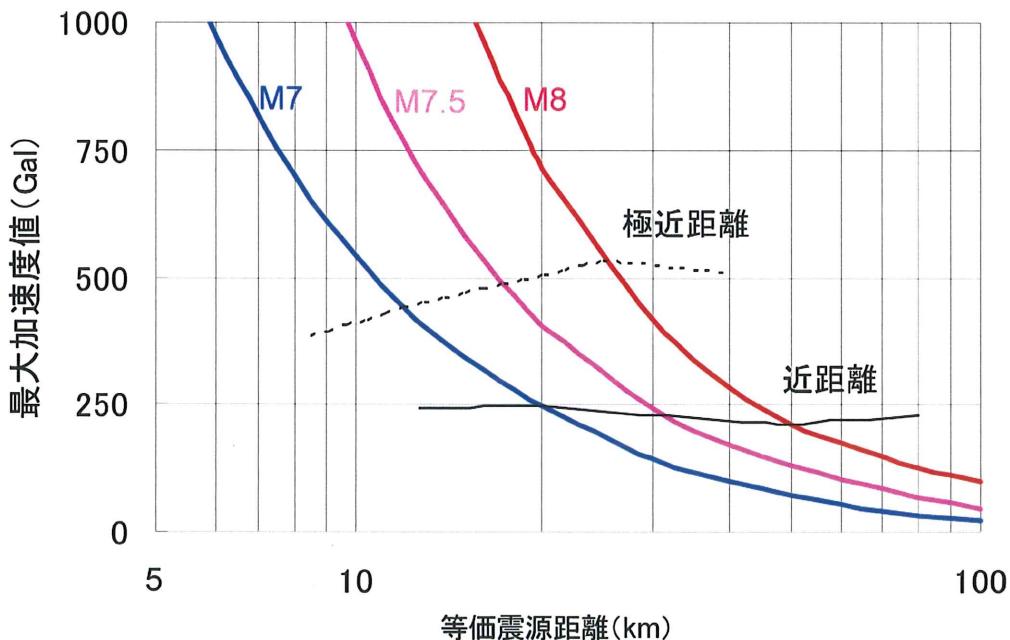


図 15: 耐専スペクトルにおける等価震源距離と地震動の最大加速度 [25] (この図から、大飯 3・4 号で適用範囲外にされている「FO-A~FO-B 断層 ($M7.4, X_{\text{eq}} = 10.5\text{km}$)」では 800 ガル以上、「FO-A~FO-B~熊川断層 ($M7.8, X_{\text{eq}} = 11.0\text{km}$)」では 1200 ガル以上になると読み取れる。)

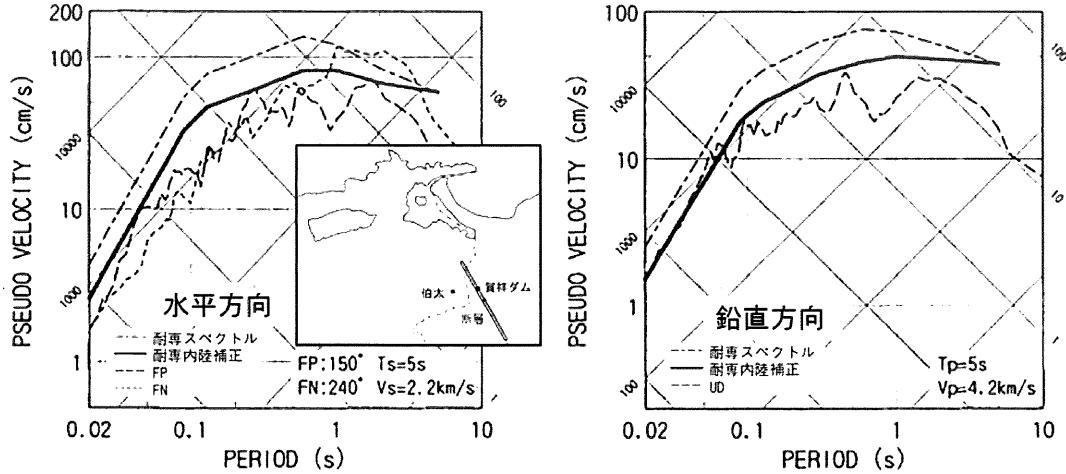


図 16: 2000 年鳥取県西部地震 (M7.3) の賀祥ダム ($X_{eq} = 6\text{km}$) での地震観測記録と耐専スペクトルの比較

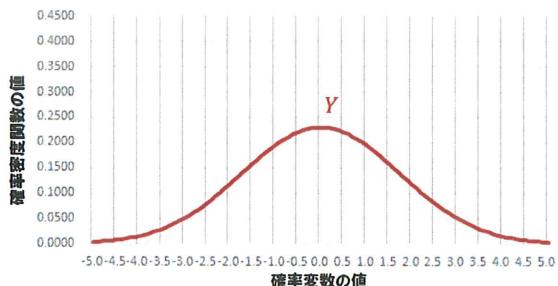
急激に大きくなり、1,200 ガル以上に達する。

さらに、今の耐専スペクトルは、図 18 のように、地震観測データを地震規模（気象庁マグニチュード）と断層の拡がりを考慮した等価震源距離で分類し、データとの誤差（バラツキ）ができるだけ小さくするような「平均像」として作成されている。地震基盤表面での地震動評価を行うことでサイト特性は可能な限り除去されているが、作成当時には国内地震観測記録が少なかったため、震源特性の異なる海洋プレート間地震と内陸地殻内地震が混在したままの「平均像」である。そこで、内陸地殻内地震用にはそれに則した補正係数を用いることになっているが、海洋プレート間地震との震源特性等の違いを補正しても、図 22 のように大きなバラツキがある。これは、東京電力が原子力安全委員会の指示により耐専スペクトルの適用可能性を 2009 年段階で検討したものであり、震源近傍 6~33km の地震観測記録に対する耐専スペクトル（内陸補正有）からの残差を表している [41]。この図から、実際の地震観測値は残差平均より「倍半分」（やや太い青実線の範囲）以上のバラツキがあり、内陸補正をした耐専スペクトルからも「倍半分」（「観測/耐専」の値で 0.5~2 の範囲）以上のバラツキがあることがわかる。

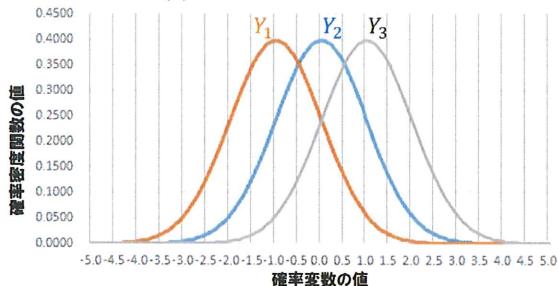
地震とは、プレート運動によって震源断層面ないしその周辺に蓄積された歪みエネルギーが断層運動によって一挙に解放される現象である。この歪みの大きさや場所の分布は一様ではなく、断層

運動による破壊開始点、破壊伝播の速度・方向、ずれの大きさ・方向も一様ではなく、複雑な様相を帯びる。断層運動によって生じる個々の地震波も一様ではなく、破壊場所によって違う。このように断層破壊過程は一定の法則に従うとは言え、実際の破壊過程には、かなりの程度、偶然性が伴い、地震ごとに地震動が大きくばらつくことになる。このような震源における特性には地域性があり、横ずれ断層、逆断層、正断層によっても異なるが、地震データ不足のため仮説に留まっており、科学的な結論を得るには至っていない。地震波の伝わり方も距離とともに地震波が一様に減衰するのではなく、増幅される場合もあり、複雑な伝播経路特性を持つ場合がある。こうして得られる地震観測記録には、地中観測点が地震基盤と同様の固い岩盤であっても、地震によって、また、地中観測点によって大きなバラツキが生じる。このバラツキには、たとえ地震基盤で評価される耐専スペクトルのように観測点のサイト特性が除去されていても、震源特性、伝播経路特性、偶然変動によるバラツキが混在している。

このバラツキを地域性で説明するためには、十分な地震観測記録に加えて、震源特性や伝播経路特性に関するデータが不可欠である。たとえば、図 17 の (a) のように、確率変数 Y のデータが分布し、ばらついているとしよう。ここから、震源特性や伝播経路特性などの地域特性の違いによってデータを分類し、(b) のように確率変数 Y_1 , Y_2 , Y_3 の



(a) 全平均のバラツキ



(b)3 つの確率変数でバラツキを説明できる場合

図 17: 正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ($\mu = 0, \sigma^2 = 3$) に従う確率変数 Y のバラツキ (標準偏差 $\sigma = \sqrt{3}$) を $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$ の 3 つの確率変数 $Y_1 \sim N(-1, 1^2)$, $Y_2 \sim N(0, 1^2)$, $Y_3 \sim N(1, 1^2)$ に分けて説明できる場合 (b) とそうでない場合 (a) の比較

分布に分離できたとする。そうすると、確率変数 $Y_1 \sim Y_3$ はそれぞれに異なる地域性を持ったデータの母集団になり、(a)の場合よりバラツキは小さくなるが、(b)の各分布のように偶然変動のバラツキは残る。この偶然変動は、サイコロを振って出る目を予測できないように、人が制御できないものであり、地域性を考慮して得た平均像からのバラツキに対して標準偏差の何倍かの余裕を持たせて保守性を確保するのが、工学的立場である。今の耐専スペクトルでは、このような地域性に基づいたデータの分類は不可能であり、平均像からのバラツキは「震源特性、伝播経路特性、偶然変動の混在したもの」として扱うしかない。このような場合には、「図 22 に見られる 6 倍程度の大きなバラツキを考慮すべき」という立論も可能になる。

他方、川内原発では、数は少ないが地震観測記録が得られている。九州電力が再稼働申請のために原子力規制委員会へ提出した資料が図 19 および図 20 であり、川内原発の敷地内で観測された 5 地震の観測記録を応答スペクトルに直し、耐専スペクトル（内陸補正なし）との比の平均を描いたものである。図 20 の破線で示される内陸補正係数が

全国平均の内陸地殻内地震に対する耐専スペクトルの補正係数であり、川内原発の地震観測記録の平均応答スペクトル比（川内原発に対する補正係数）は短周期側で破線を越えており、1 に近い値すらとっている。つまり、内陸地殻内地震の全国平均より大きな地震動が敷地で観測されていることを示しており、ここに地域性が現れている。

ここで重要なのは、川内原発から数十 km の範囲で発生した地震に対する川内原発敷地内観測記録の平均応答スペクトル比（図 20 水平方向の実曲線）が全国平均を超えていているということに加えて、この平均応答スペクトル比（図 21 では赤線）より上側へのバラツキが短周期側（周期 0.02~0.5 秒）でほぼ 2 倍になっているということである。このバラツキは「全国各地で起きる地震や地震観測点における地域性の違い」ではなく、「川内原発周辺の地域性の違い」が少しあるとは言え、偶然変動がかなりの部分を占めていると言える。

したがって、川内原発においては、耐専スペクトルで地震動評価を行う場合、上側に 2 倍のバラツキを考慮して保守的な地震動評価を行うべきだということになる。ただし、川内原発敷地で観測された図 19 の地震は M6 クラスの小規模地震（地表に地震断層が出現しない未飽和断層による地震）であり、M7 クラスの中規模以上の地震は含まれていないこと、また、10km 未満の近距離地震や震源近傍地震は観測されていないなどを考慮すれば、これでも過小評価に陥る可能性は残る。

高浜 3・4 号や大飯 3・4 号では、このような敷地内地震観測記録が存在しないため、地域性を抽出することも偶然変動の大きさを評価することもできない。川内原発と同様の地域性があるとすれば、全国平均より大きな地震動が原発を襲うと言えるし、耐専スペクトルを少なくとも 2 倍にして川内原発で見られる 2 倍の偶然変動を考慮した保守的な評価を行うべきだということになる。そうすると、高浜 3・4 号では耐専スペクトルを 1,300 ガル以上へ、大飯 3・4 号では 2,400 ガル以上へ引上げる必要があるということになる。

ちなみに、関西電力などが耐専スペクトルで補正係数を用いていないのは、2007 年新潟県中越沖地震の教訓より「震源特性を 1.5 倍にする必要性

水平動の耐専スペクトル(地震基盤相当)
他地点観測記録(各コントロール点のMとXeq相当に変換)

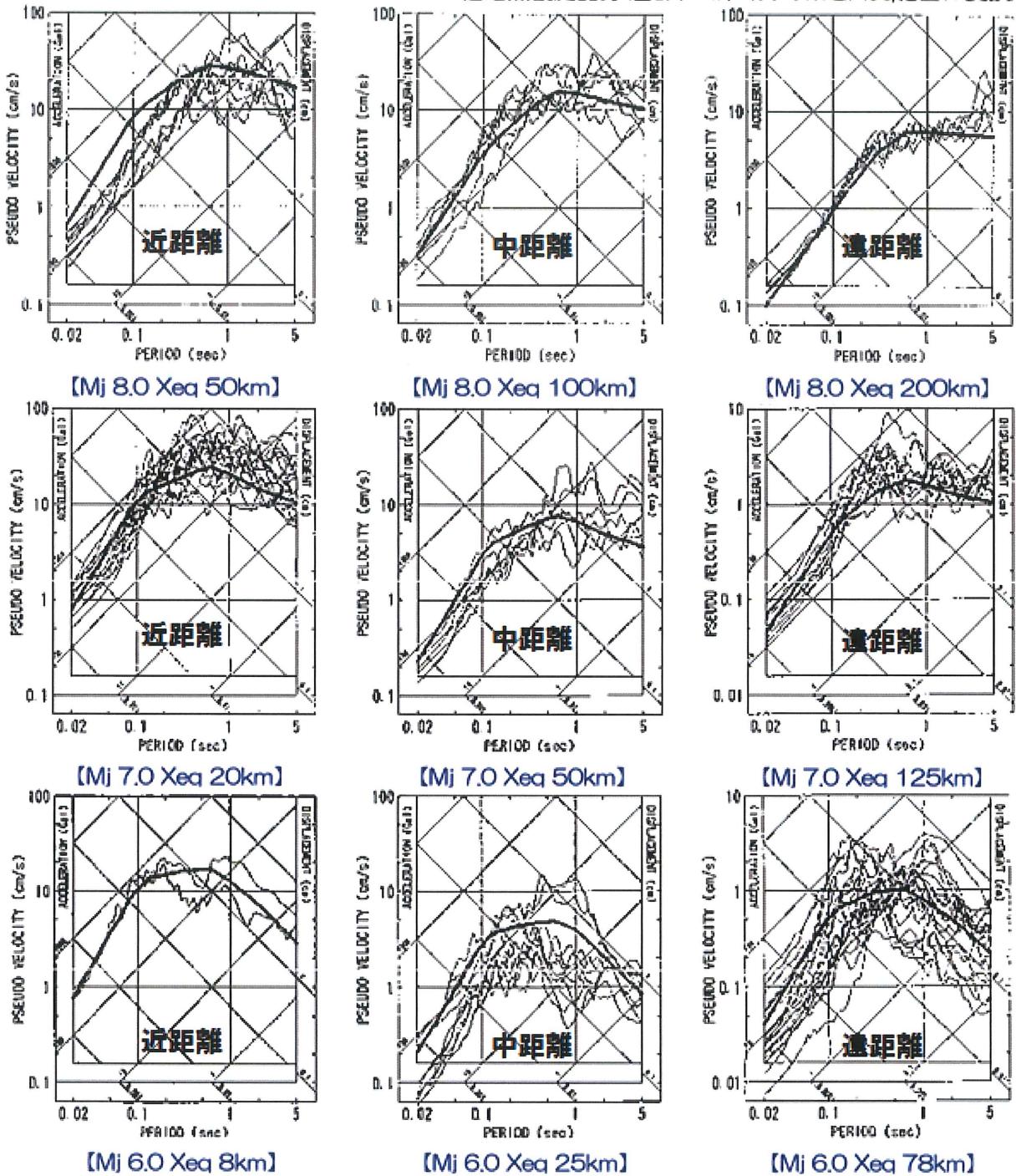


図 18: 耐専スペクトル作成の元になった地震観測記録の応答スペクトル（地震基盤表面はぎとり波）と耐専スペクトルの関係（気象庁マグニチュード M_j と等価震源距離 X_{eq} の組合せでデータを分類し、その平均像として耐専スペクトルを求めている。震源特性や伝播経路特性などの地域性や偶然変動などによるバラツキの大きいことがわかる。）[41]

がある」(図 31 参照) ことに鑑み、「耐専スペクトルに補正係数(全国平均では図 20 の破線のように短周期側で 0.6 度になる)を用いないことで 1.5 倍相当の余裕をもたせる」ためである。これは震源特性における地域性の違いを考慮するものであ

り、偶然変動による少なくとも 2 倍のバラツキを考慮すべきだという上記の議論とは全く別のものである。

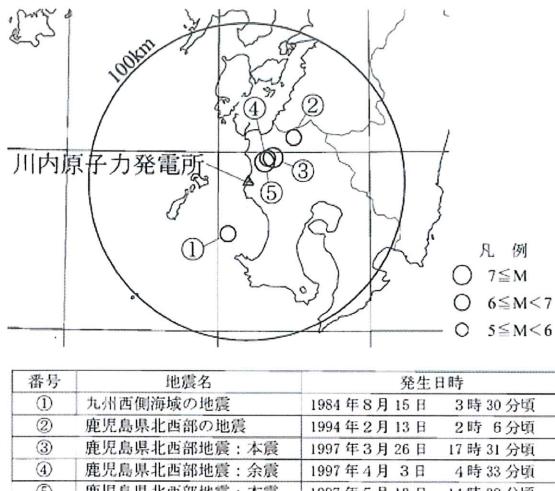


図 19: 川内原発で観測された活断層による地震 [29]

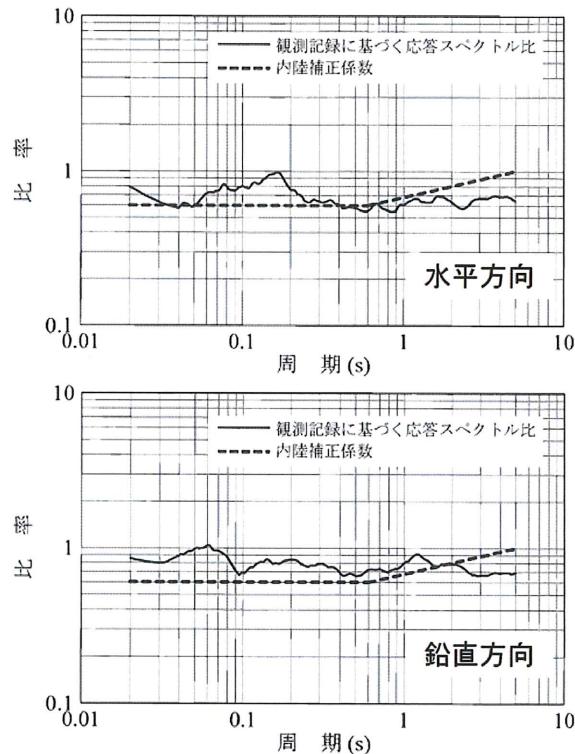


図 20: 川内原発での内陸地殻内地震観測記録に基づく耐専スペクトルの補正係数 [29] (破線はNoda et al.(2002)[32] の示した国内の内陸地殻内地震に対する平均的な補正係数、実線が川内原発での観測記録に基づく補正係数)

3.2 断層モデルのレシピは地震規模と応力低下量を過小設定し、地震動を過小評価している

次に、高浜3・4号と大飯3・4号における断層モデルによる地震動の過小評価について述べる。

高浜3・4号におけるFO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果（基本ケースに加え短周期1.5倍ケースなど不

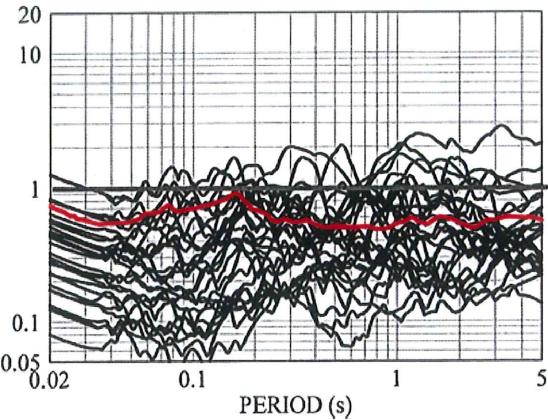


図 21: 川内原発の敷地地盤で得られた観測記録の応答スペクトルとNoda et al.(2002)の方法により求められた応答スペクトルの比 (主文[43]別紙図④p.294: 図 20 水平方向の応答スペクトル比を赤線で追記)

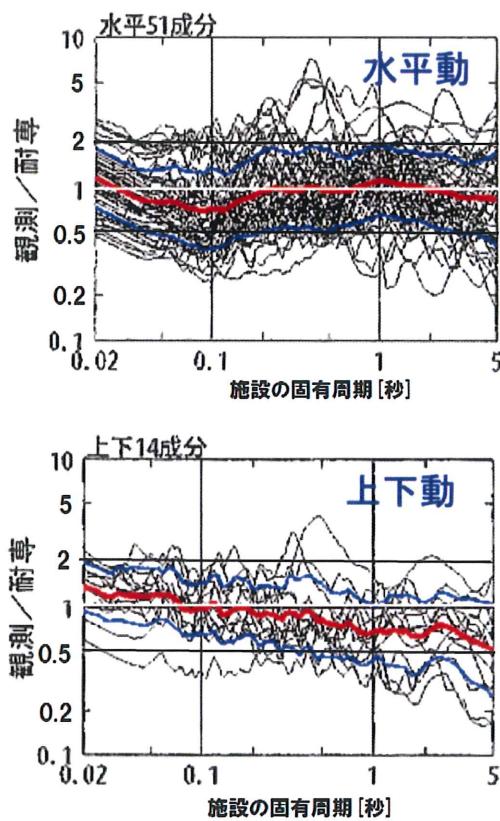


図 22: 国内外の内陸地殻内地震による震源近傍の観測記録 ($M_{6.0} \sim 8.1$, $X_{eq} = 6 \sim 33\text{km}$, 水平 51 記録, 上下 14 記録) の耐専スペクトル(内陸補正有)との残差(バラツキ)[41] (細線: 各地震観測記録に対する残差、太い赤実線: 残差の平均、やや太い青実線: 平均からの「倍半分」の差、0.5 秒付近では水平動で 6 倍程度、上下動で 4 倍程度の残差がある)

確実さを考慮した全ケースを含む) を重ね書きしたもののが図 23～図 25 であり、図中の赤線が耐専スペクトル(内陸補正無)、黒折れ線が基準地震動 Ss-1 である。

鉛直方向の図 25 では、短周期側でやや小さいも

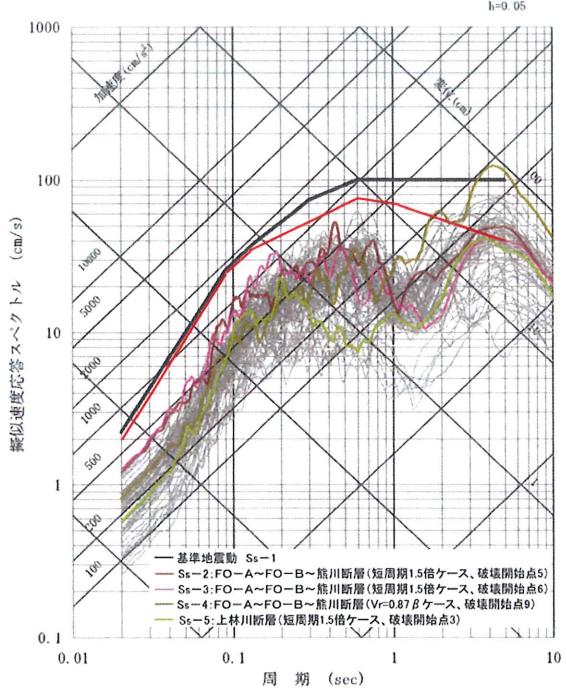


図 23: 高浜 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果(灰色の波線は基準地震動 Ss-2～5 以外の全評価結果)と FO-A～FO-B～熊川断層(傾斜角 75 度)の耐専スペクトル(赤折れ線)および基準地震動 Ss-1(水平 NS 方向)(2014 年 8 月)[27]

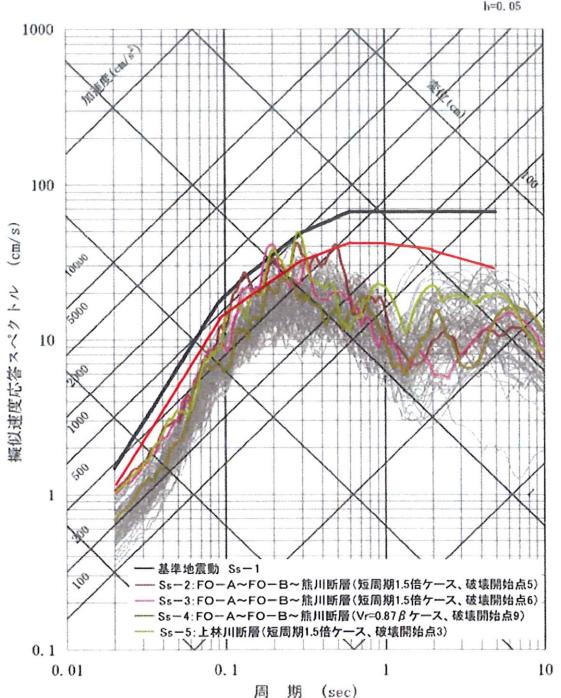


図 25: 高浜 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果(灰色の波線は基準地震動 Ss-2～5 以外の全評価結果)と FO-A～FO-B～熊川断層(傾斜角 75 度)の耐専スペクトル(赤折れ線)および基準地震動 Ss-1(鉛直方向)(2014 年 8 月)[27]

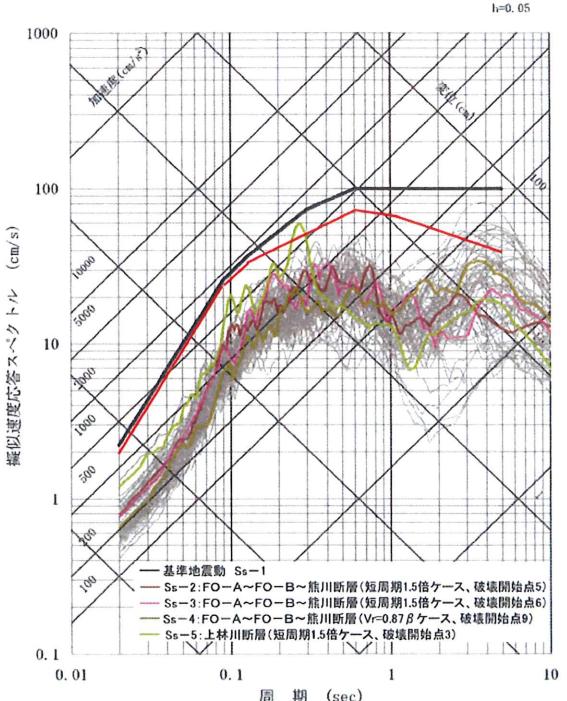


図 24: 高浜 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果(灰色の波線は基準地震動 Ss-2～5 以外の全評価結果)と FO-A～FO-B～熊川断層(傾斜角 75 度)の耐専スペクトル(赤折れ線)および基準地震動 Ss-1(水平 EW 方向)(2014 年 8 月)[27]

の耐専スペクトルとほぼ整合していると言えるが、図 23 と図 24 では、原発にとって重要な短周期領域 0.03～0.5sec で耐専スペクトルの 1/2 程度またはそれ以下である。これは明らかに過小評価だと言える。

この差について、原子力規制庁は「手法の違い」でごまかし、関西電力は「耐専スペクトルは震源断層を点震源とみなし、断層モデルは震源断層をそのまま評価するからだ」と決めつける。しかし、同じ関西電力の説明では、耐専スペクトルは「原子力発電所の地震動評価に適した信頼性の高い手法」だったはずであり、単なる「点震源」ではなく震源断層の広がりやアスペリティなどを考慮した等価震源距離を用いており、批判は当たらない。

そうではなく、問題は地震データの違いにある。耐専スペクトルは国内の地震データに基づいているのに対し、今の断層モデルは北米中心の地震データ（日本国内より平均断層幅が大きい）に基づいており、この断層モデルを日本国内の震源断層にそのまま適用すると、地震規模や応力降下量が過小評価されるからである（巻末注 3）。

これを端的に物語る「島根原発における宍道断層」の例を示そう。

中国電力は2006年指針改定に伴うバックチェック中間報告[5]で、宍道断層（長さ22km, M7.1）について、断層モデルのレシピに基づく地震動評価（長さ22km、断層幅13kmの基本ケース、短周期側は統計的グリーン関数法、長周期側は理論的方法のハイブリッド合成法）を行い、図26黒線のように示している。耐専スペクトルについては、等価震源距離が9.0kmと近すぎるという理由で適用していないが、図26の赤線のように「参考」扱いとしながらも示している。ただし、当時の耐専スペクトルは島根原発敷地内での地震観測記録に基づいて補正（図26の右図が補正係数）されたものであり、断層モデルと条件は等しい。図26で明らかのように、断層モデルによる地震動評価結果は、周期0.02～0.2秒の重要な周期帯で耐専スペクトル（内陸補正後）の1/2程度にすぎない。これは高浜3・4号における結果（図23および図24）と全く同じである。

島根原発でも、断層モデルのレシピに従い、地震規模がM7.1（松田式による）ではなくM6.8と小さく設定され、その結果、応力降下量も小さく設定されていた。そこで、2010年の第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3[5]では、地震規模をM7.1として震源断層を少し大きく設定し直す修正レシピによって、地震動評価をやり直させた。

これは推本が2008年に公表した修正レシピ[20]に基づくものであり、断層幅を13kmから15kmへ拡張し、地震モーメントをM7.1に相当する $1.06 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$ とし、断層モデルのレシピに基づいて、応力降下量を断層平均で2.3MPaから4.32MPaへ、アスペリティ平均で15.1MPaから19.7MPaへ引上げ、解放基盤表面上観測点（2km間隔）での地震動を図27のように求めている。図27における最上部の地震波が極近傍の地震波であり、断層最短距離2kmに位置する島根原発の解放基盤表面での地震動評価に相当する。これと宍道断層（M7.1, $X_{eq} = 9.0 \text{ km}$ ）の耐専スペクトルはよく重なり合っている（巻末注4）。つまり、断層モデルのレシピをそのまま適用するのではなく、松田式（巻末注

5）で求めた地震規模に合わせて断層モデルを少し修正すれば、断層モデルと耐専スペクトルによる地震動評価結果は互いによく合ってくるのである。

高浜3・4号の場合にも同じことが言える。

表4には、「FO-A～FO-B～熊川断層」（断層長さ63.4km, M7.8）の断層モデルのパラメータを示したが、関西電力はこの断層の地震規模をM7.7（ $M_0 = 5.03 \times 10^{19} \text{ Nm}$ ）と小さくし、応力降下量を断層平均3.1MPa、アスペリティ平均14.1MPaとしている。地震規模を松田式によるM7.8（ $M_0 = 7.01 \times 10^{19} \text{ Nm}$ ）とした場合には、応力降下量はそれぞれ5.8MPa、26.5MPaになる。ただし、修正レシピのようには断層面積を増やしていない。また、関西電力は応力降下量を100km以上の長大な断層の場合に適用すべきFujii-Matsu'ura(2000)を用いて小さく設定している（巻末注5）。

このように、高浜3・4号においても、島根原発の場合と同様に、松田式に基づく地震規模や応力降下量を用いれば、断層モデルと耐専スペクトルにおける地震動評価結果の差がほとんどなくなることは明らかである。つまり、断層モデルと耐専スペクトルとで差が生じる原因是、断層モデルにおけるパラメータ設定の過小設定にあったのである。

この点で注目すべきは、先に示した前原子力規制委員会委員長代理の島崎邦彦氏による学会発表での入倉式への批判である[36]。これは断層モデルのレシピ（入倉式）による地震規模が松田式による値より過小設定になると批判し警告したものである。それを応力降下量に関する批判にまで徹底させれば、ここでの指摘と完全に一致する。

次に、大飯3・4号の基準地震動に移ろう。

大飯3・4号では、「FO-A～FO-B～熊川断層」の耐専スペクトルは等価震源距離が11.0kmと近いため適用外とされており、700ガルの基準地震動Ss-1はそのままで、もっぱら断層モデルによる評価が行われている。その結果が、図28～図30であり、基準地震動Ss-2～17以外の灰色の波線が不確実さを考慮した全ケースの重ね書きである。これらの図を高浜3・4号の結果（図23～図25）と比べるとほぼ2倍になっている。このことは、高浜3・4号の基準地震動Ss-2～4（表2）と大飯3・4号の基準地震動Ss-2～17（表3）の最大加速度（周期

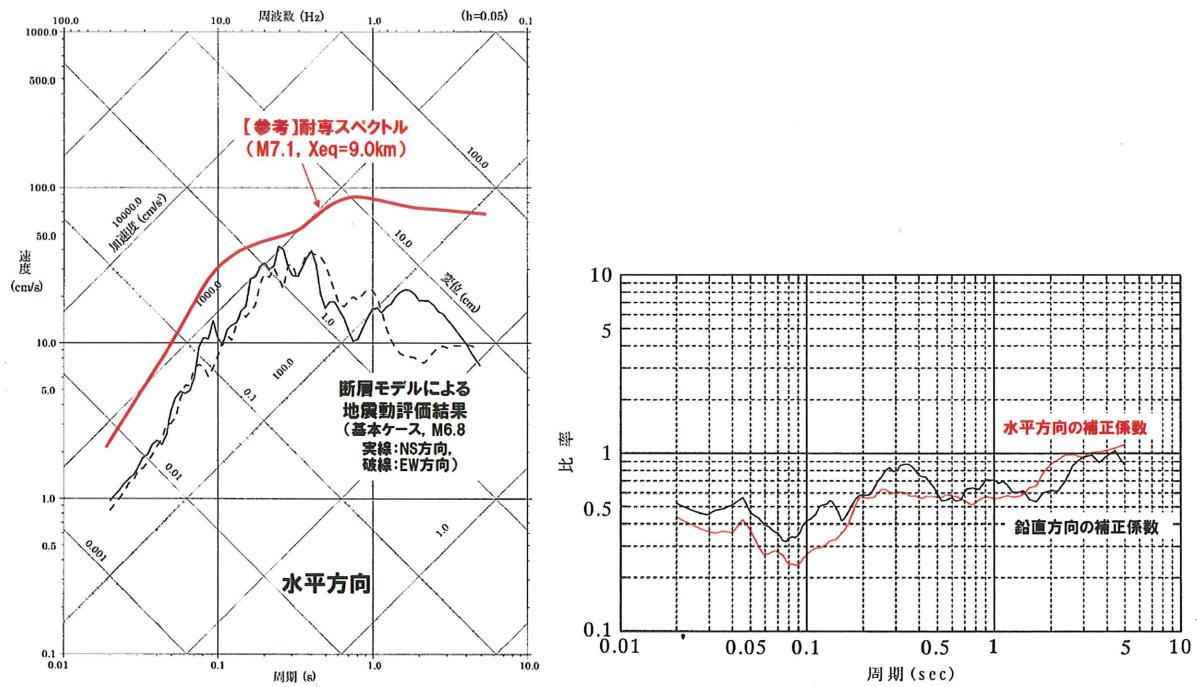


図 26: 宍道断層 ($M=7.1$, $X_{eq} = 9.0\text{km}$) の耐専スペクトル(右図「島根原発敷地内地震観測記録による補正係数」で補正されたものだが、宍道断層が近すぎるため適用範囲外とされ「参考」扱いにされている)と断層モデル ($M=6.8$, 長さ 22km, 幅 13km) による地震動評価結果の比較 [6]

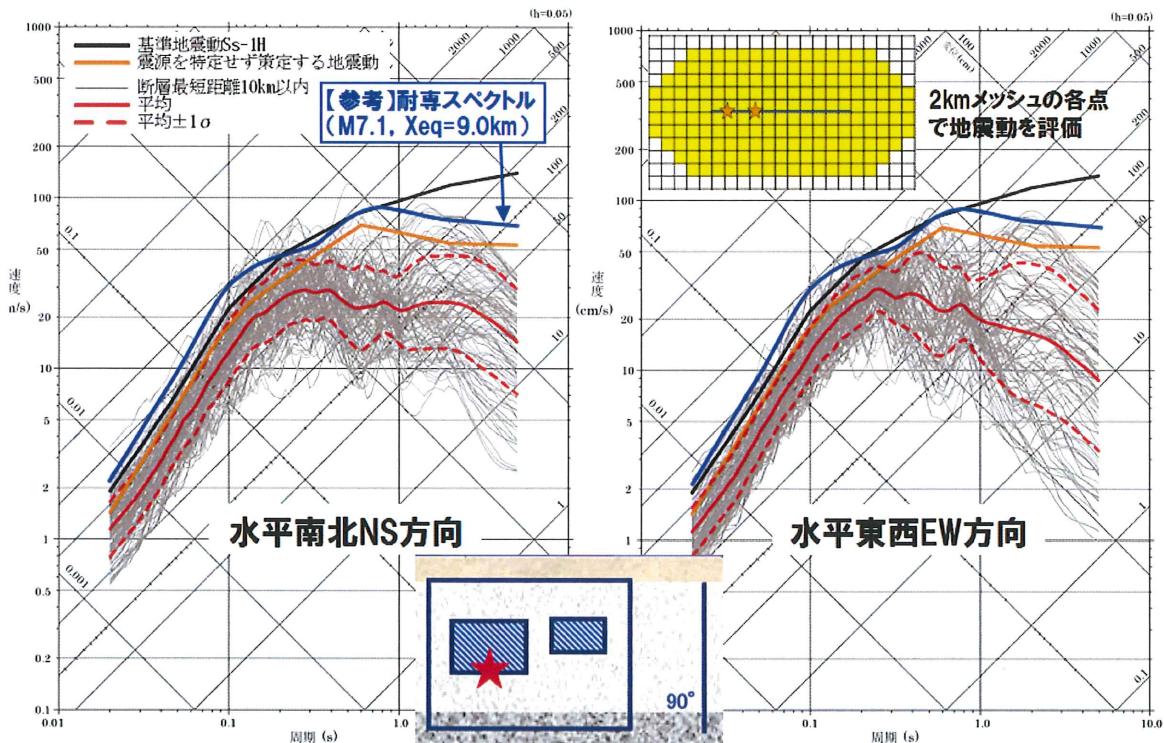


図 27: 宍道断層 ($M=7.1$, $X_{eq} = 9.0\text{km}$) の耐専スペクトル(図 26と同じ, 【参考】として追記)と修正断層モデル(ケース 2 : $M=7.1$, 長さ 22km, 幅 15km, 破壊開始点第 1 アスペリティ下端中央)による断層周辺極近傍観測点での評価結果の比較 [5]

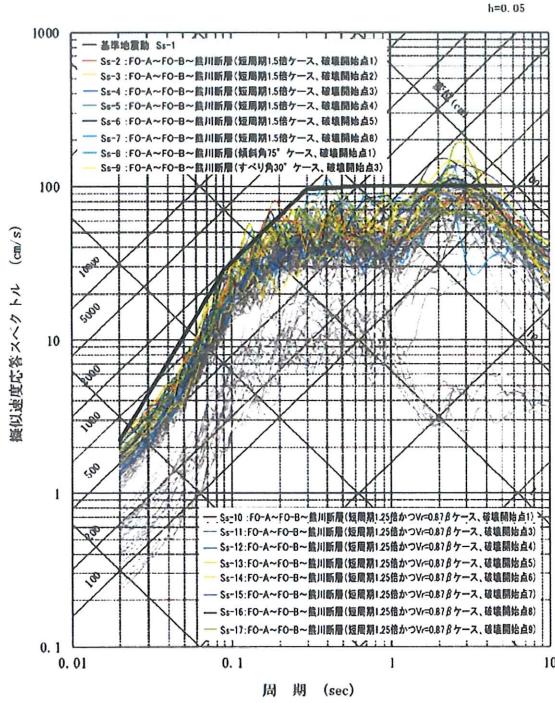


図 28: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層と上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1 (水平 NS 方向) (2015 年 3 月)[28]

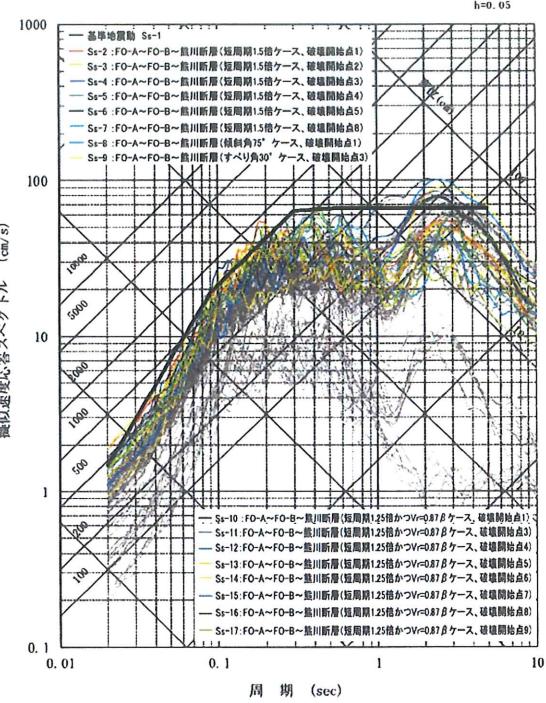


図 30: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層と上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1 (鉛直方向) (2015 年 3 月)[28]

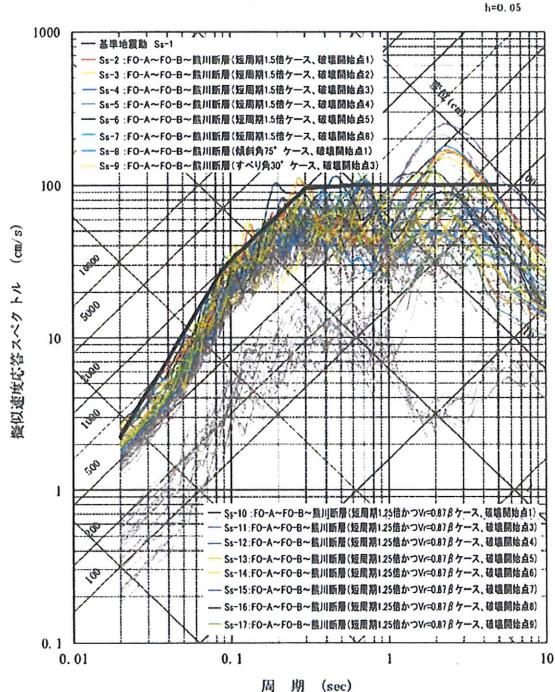


図 29: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層と上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1 (水平 EW 方向) (2015 年 3 月)[28]

0.02 秒における応答加速度に相当する)を比べてみれば、一目瞭然であり、EW 方向では 2~3 倍にもなっている。ところが、Ss-1 の最大加速度は全く変わらない。耐専スペクトルが適用外になって

いるからである。

先に、大飯 3・4 号における「FO-A～FO-B～熊川断層」(M7.8, $X_{eq} = 11.0\text{ km}$) の耐専スペクトルは、図 15 から 1,200 ガル以上に達すると書いた。断層との距離が小さくなつて、断層モデルによる地震動評価結果が 2 倍になるのであれば、耐専スペクトルによる地震動評価が 700 ガル弱からほぼ 2 倍の 1,200 ガル以上になつて当然である。等価震源距離が極近距離から乖離しても「適用外」とされなければならないほど、耐専スペクトルが地震動を「過大評価」するとは言えない。2000 年鳥取県西部地震における賀祥ダムと同様に妥当と言えるのではなかろうか。

「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層パラメータは表 4 の通りであり、大飯 3・4 号と高浜 3・4 号とで変わらない。大飯 3・4 号でも地震規模と応力降下量が過小設定されており、松田式に基づく地震規模と応力降下量で置換えれば、断層モデルによる地震動評価は耐専スペクトルによる地震動評価と一致するはずである。この論争に決着を付けるには、実際に「FO-A～FO-B～熊川断層」で地震が起きる以外にないが、それでは遅すぎる。福島第一原発事故を真に教訓とするのであれば、耐専ス

表 4: FO-A～FO-B～熊川断層の断層パラメータ（上端深さ 3km の基本ケース）』[25, 27, 28]

断層パラメータ (すべて $S_a/S = 0.22$ 法による)	断層モデルで M7.7 とした場合（関電）			松田式 (M7.8)	
	全体	FO-A～FO-B	熊川断層	全体	
断層長さ L	63.4 km	36.2 km	27.2 km	63.4 km	
断層幅 W			15.0 km		
断層面積 $S = LW$	951 km ²	543 km ²	408 km ²	951 km ²	
断層上端深さ			3 km		
断層下端深さ			18 km		
破壊開始点	各アスペリティ下端 6 種類+断層下端 3 種類				
破壊伝播方式	同心円状(放射状)				
地震モーメント M_0 [N·m]	5.03×10^{19}	3.05×10^{19}	1.98×10^{19}	7.01×10^{19}	
マグニチュード	M7.7, M _W 7.1			M7.8, M _W 7.2	
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	151.2 cm	160.3 cm	139.0 cm	210.8 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.5×10^{10} N/m ²				
S 波速度 V_s (または β)	3.6 km/s				
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.59 km/s				
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$	3.1 MPa (4.2MPa) ^{*1}			5.8 MPa	
短周期レベル A [N·m/s ²]	1.96×10^{19}			2.19×10^{19}	
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9}M_0^{1/3}$	1.61 sec			1.80 sec	
アスペリティ 全体	面積 S_a	209.22 km ²	119.46 km ²	89.76 km ²	209.22 km ²
	地震モーメント M_{0a} [N·m]	2.22×10^{19}	1.35×10^{19}	8.77×10^{18}	3.10×10^{19}
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.1 MPa (19.0MPa) ^{*1}			26.5 MPa
	平均すべり量 D_a	303.9 cm	322.3 cm	279.4 cm	423.7 cm
アスペリティ 大	面積 S_{a1}	—	79.64 km ²	—	—
	地震モーメント M_{0a1} [N·m]	—	9.95×10^{18}	—	—
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1}$	—	14.1 MPa ^{*1}	—	—
	平均すべり量 D_{a1}	—	357.1 cm	—	—
アスペリティ 小	面積 S_{a2}	—	39.82 km ²	—	—
	地震モーメント M_{0a2} [N·m]	—	3.52×10^{18}	—	—
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2}$	—	14.1 MPa ^{*1}	—	—
	平均すべり量 D_{a2}	—	252.5 cm	—	—
領域 端	面積 $S_b = S - S_a$	741.78 km ²	423.54 km ²	318.24 km ²	741.78 km ²
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	2.81×10^{19}	1.70×10^{19}	1.11×10^{19}	3.91×10^{19}
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.8 MPa (3.8MPa) ^{*1}			5.3 MPa
	平均すべり量 D_b	108.1 cm	114.7 cm	99.4 cm	150.7 cm
Q 値		50f ^{1.1}			
高周波限界遮断周波数 f_{max}		8.3Hz			

注: 「 $S_a/S = 0.22$ 法」とはアスペリティ総面積を断層面積の 22 %に固定する方法である。関西電力は、「FO-A～FO-B」の 35.3km モデルでは A 法 ($S_a/S = 0.248$) を用い、熊川断層との連動 63.4km モデル (A 法では $S_a/S = 0.366 > 0.30$) では「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用い、さらに Fujii-Matsu'ura(2000) で応力降下量を小さく設定している。

*1: 地震調査研究推進本部(推本)による断層モデルのレシピによれば、長大な断層の場合には、Fujii-Matsu'ura(2000) の $M_0 - (L, W)$ 関係式から導かれた断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 3.1$ MPa を用い、アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22 = 14.4$ MPa (上表では 14.1 となっているが、原本での数値の丸め誤差による) と算出して用いることを推奨している。問題はどの長さ以上を「長大な断層」とみなすかであるが、推本の「活断層の長期評価手法(暫定版)」報告書(2010.11.25) では「長さが 100km を超えるような長大な断層」(同報告書 p.6) と定義しており、63.4km では到底、長大な断層とは言えない。そこで、長大でない断層の場合に用いられるレシピで平均応力降下量を算出して括弧内に記しておいた。通常のレシピによれば、アスペリティの平均応力降下量は 19.0MPa となり、14.1MPa の 1.35 倍になることがわかる。また、断層長さから松田式で求めた地震規模は M7.8 になり、地震モーメント M_0 で比較すると 1.4 倍になる。その結果、応力降下量も、断層平均 5.8MPa、アスペリティ平均 26.5MPa と大きくなる。不確実さの考慮では応力降下量を 1.5 倍しているが、14.1 MPa では 21.2MPa に留まるが、大飯原発の地震動評価ではこの地震動が基準地震動 Ss-1H を超えている。19.0MPa の 1.5 倍は 28.5MPa となるから、さらに大きく超え、26.5MPa とその 1.5 倍化も考慮すればさらに大きく超えることになろう。

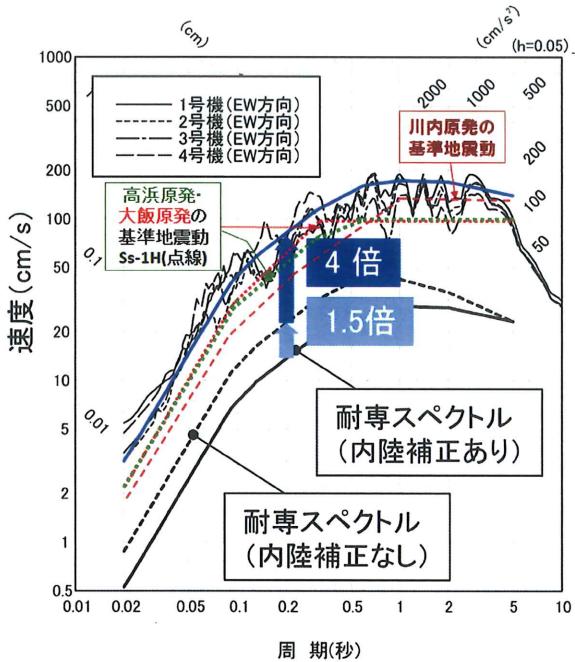


図 31: 柏崎刈羽原発 1~4 号での新潟県中越地震時の解放基盤表面地震動はぎとり波の応答スペクトル（東西 EW 方向）[40]（東電が推定した解放基盤表面地震動（はぎとり波）の最大加速度（上図で周期 0.02 秒における応答加速度に対応する）は、1699gal(1 号), 1011(2 号), 1113(3 号), 1478(4 号), 766(5 号), 539(6 号), 613(7 号) である。耐専スペクトルの「内陸補正あり」は海洋プレート間地震のデータ等の混在したデータによる耐専スペクトルを内陸地殻内陸地震のスペクトルに補正するもので、「内陸補正なし」を約 0.6 倍したものである。）

ペクトルを適用し、断層モデルのパラメータを設定し直して、地震動評価をやり直すべきである。

1,300 ガル以上の地震動は実際に観測されている。

2007 年新潟県中越沖地震 (M6.8) では図 31 のように 1699 ガル（解放基盤表面はぎとり波）、2008 年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) では、表 5 のように地中で 1,078 ガル（3 成分合成）、解放基盤表面はぎとり波相当で図 32 のように NS 方向 2,000 ガル ([12]p.31) の地震動が相次いで観測された。これらはいずれも高浜 3・4 号と大飯 3・4 号のクリフエッジを超えている。

2007 年新潟県中越沖地震以降、震源特性として約 1.5 倍²の不確実さを考慮し、深部地下構造や 3 次元地盤構造を詳細に調べることが常識となった。そのため、耐専スペクトルでは、内陸補正を行わないことで震源特性の不確実さを考慮することに

² 東京電力や独立行政法人 原子力安全基盤機構 JNES の解析によれば、震源特性の要因で約 1.5 倍、深部地盤構造の伝播経路特性で約 2 倍、敷地内の古い褶曲構造などサイト（地盤）特性で約 2 倍、合計約 6 倍に増幅されたという [40]。

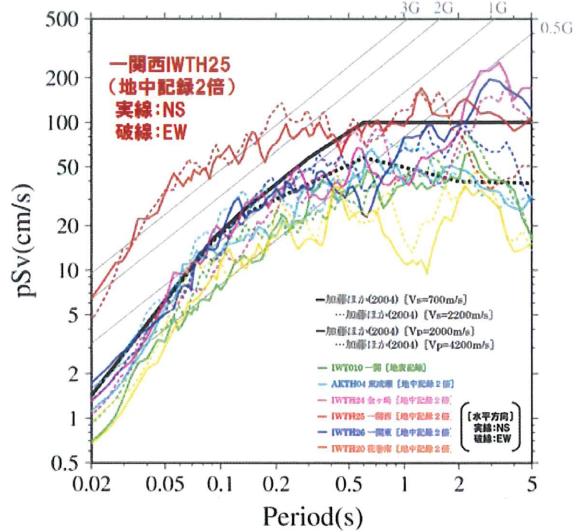


図 32: 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地中地震観測記録の応答スペクトル [11] を 2 倍にした「はぎとり波」相当の応答スペクトル [12]（一関西 IWTH25 観測点の「はぎとり波」は NS 方向で 2,000 ガルになり、短周期側で大きく盛り上がっている）

表 5: 2008 年岩手・宮城内陸地震 M7.2 による強震観測値（加速度 [gal], 速度 [cm/s]）[1]

観測点	3 成分合成	東西	南北	上下
一関西 (地表) (地中)	4022 gal 1078 gal	1143 1036	1433 748	3866 640
一関西 (地表) (地中)	100.1cm/s 73.2cm/s	71.0 42.2	61.5 37.2	84.7 68.5

なったのである。これに対応して、断層モデルでも、不確実さの考慮として応力降下量（および短周期レベル）を「1.5 倍または 20MPa の大きい方」に設定することとし、「特に応力降下量が 20MPa 以下のサイトは適切性について再点検が必要」と注意している [10]。ここでも、原子力安全規制は後追いでしかなかった。そして、2011 年 3 月には決定的で致命的な「先行規制の遅れ・失敗」を経験してしまうのである。このような経験を二度と繰り返してはならない。

2008 年岩手・宮城内陸地震は「震源を特定せず策定する地震動」の 16 地震のうちの一つに挙げられたが、一関西（いちのせきにし）における表 5 の極めて大きな地震観測記録（地表で 4,022 ガル、地中で 1,078 ガル）³が採用された原発は未だにない。一

³ 入倉ら [17] は、P 波速度を 1/2 以下に小さくして短周期地震波を大きくし、Q 値を「劇的に小さく」して振幅を抑え、上下動の非対称性についてトランポリン効果等を考えれば、極めて大きな地表地震動の生成メカニズムを一応説明できるとしている。しかし、地中で 3 成分合成最大加速度は 1078gal に達し、上下動の最大速度は 68.5cm/s で水平動 42.2cm/s(EW)

関西の地中地震計は深さ 260m, S 波速度 1,810m/s の固い岩盤に設置されており、表 1 の若狭の原発の解放基盤表面位置のせん断波 (S 波) 速度と同等と言える。地中観測記録の応答スペクトルを 2 倍にした解放基盤表面はぎとり波相当の応答スペクトルは図 32 の通りであり、NS 方向で 2,000 ガルにもなる。泊原発の審査（2015 年 3 月）でようやくこの地震観測記録が検討されたが、図 32 の一関西以外の観測点での 1/4 以下の小さな観測記録が採用されようとしている。その理由は「IWTH25（一関西）については、トランポリン効果、ロッキング振動の要因や大加速度が発生した要因を特定するため、地盤構造等の調査、調査結果を踏まえたはぎとり解析、および震源特性を踏まえた検討が必要である。それらの検討には相応の期間が必要であり、現時点では信頼性の高い基盤地震動の評価は困難である。」[12] というものである。しかし、地表記録はともかく、解放基盤表面相当の固い岩盤に設置された地中地震計による地中記録にはトランポリン効果やロッキング振動による影響は見られない。2008 年 6 月 14 日の強震動観測から 7 年以上が経つのに、一向に調査・解析が進まない。「調査・解析を進めないことが利益になるからサボタージュしている」としか思えない。震源近傍でせっかく取れた貴重な地震観測記録がこのような形で生かされないままお蔵入りにされるのであれば、「地震観測記録が新たに取れれば、震源を特定せず策定する地震動の考慮対象に組み入れる」と原子力規制委員会・原子力規制庁がいくら強調しても、説得力はない。「大きすぎる地震動は考慮しない」という方針を探っているとしか思えないからである。

断層モデルの平均像における地震動の過小評価とその原因については、すでに述べたとおりだが、松田式の適用や修正レシピなどでこの平均像における過小評価が是正されたとしても、平均像からの偶然変動のバラツキを保守的に考慮する必要性が依然として残されている。これを定量的に評価するためには、実際の地震観測記録と断層モデルによる地震動評価結果をつきあわせて評価する以

の 1.5 倍を超えた。しかも、地表記録で見られた上下動の非対称性（トランポリン効果）は地中記録には見られない。この生成原因については不明なままである。

外にない。たとえば、2008 年岩手・宮城内陸地震の震源断層の長さと幅だけが分かっているとして、一関西の地中観測点での地震動評価を断層モデルで行い、地中観測記録と比較するのも一つの方法である。このような比較検討ができないのであれば、耐専スペクトルと同様に、少なくとも 2 倍の偶然変動を考慮すべきである。たとえば、要素地震の振幅を「平均像における不確実さ（地域性）の考慮」からさらに少なくとも 2 倍にする（巻末注 6）などして断層モデルによる地震動評価をやり直すべきである。

高浜 3・4 号と大飯 3・4 号の基準地震動はもとよりクリフエッジをもはるかに超える地震動が実際に起きている。このような地震動が実際にこれらの原発を襲うことになれば、炉心溶融事故を避けることはできないであろう。福島第一原発事故を経験してもなお「後追い規制」を続けることは、もはや許されない。

4 結言

本意見書では、高浜 3・4 号と大飯 3・4 号の基準地震動を精査し、「震源を特定せず策定する地震動」と「震源を特定して策定する地震動」のいずれにも重大な過小評価があることを明らかにした。その要旨は以下の通りである。

(1) 「震源を特定せず策定する地震動」として、「2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」が採用されている。ところが、この留萌支庁南部地震においては、地震計の設置不足を補うため、地域地盤環境研究所が震源断層モデルを用いて地震観測点以外の震源域内での地震動を再現解析しており、その最大値は地震観測記録の 1.8 倍になる。これを考慮すれば、留萌支庁南部地震を考慮した地震動は 1,100 ガル程度になり、高浜 3・4 号のクリフエッジ 973 ガルを超える。さらに、原子力安全基盤機構（現在は原子力規制庁）は国内の地震観測記録を反映した独自の断層モデルによる地震動解析を行い、M6.5 の横ずれ断層で 1,340 ガルの地震動が起こることを明らかにしている。これを採用すれば、高浜 3・4 号だけでなく、大飯 3・4 号のクリフエッジ 1,260 ガルを超える。

(2) 「震源を特定して策定する地震動」は、基本的に「FO-A～FO-B～熊川断層」の地震動評価に基づいている。高浜3・4号で700ガルの基準地震動Ss-1を規定しているのは耐専スペクトルによる地震動評価だが、最近20年間の震源近傍での地震観測記録は反映されておらず、現在見直し作業中であり、改定後の耐専スペクトルを用いるべきである。また、耐専スペクトルは平均的な応答スペクトルにすぎず、地域差以外の偶然変動によるバラツキをも考慮すれば少なくとも2倍の余裕を持たせるべきである。そうすれば1,300ガル以上になり、クリフェッジを超える。高浜3・4号における断層モデルによる評価は耐専スペクトルによる評価の1/2以下と小さく、明らかに過小評価であり、断層モデルの欠陥を示唆している。

大飯3・4号では、断層との距離が近すぎるという理由で耐専スペクトルは適用されていないが、関西電力の示した耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係図から1,200ガル以上になる。また、大飯3・4号と高浜3・4号の断層モデルによる地震動評価には2倍の差があり、大飯3・4号で耐専スペクトルが適用されれば、高浜3・4号における700ガル弱の2倍になって当然であり、「適用外」とする根拠に乏しいことを示唆している。さらに、耐専スペクトルにおける偶然変動などの少なくとも2倍のバラツキを考慮すれば2,400ガル以上になる可能性もある。これは、原子力安全基盤機構の独自の断層モデルによる地震動解析結果とも一致しており、2008年岩手・宮城内陸地震の地中地震計による1,078ガル（3成分合成、基準地震動と同じ解放基盤表面はぎとり波相当で2,000ガル）の地震観測記録等とも整合している。

つまり、「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」のいずれにおいても地震動が過小評価されており、最新の知見に基づいて基準地震動を保守的に設定し直せば、高浜3・4号と大飯3・4号のいずれにおいてもクリフェッジを超えることは避けられない。

以上の知見の多くは、原子力規制委員会・原子力規制庁にも伝え、議論してきたところである。原子力規制庁は、原子力安全基盤機構の断層モデルについて検討する必要性を2015年1月に認めな

がら未だに検討していない。耐専スペクトルが見直し作業中であると知りつつ、古いままで使っており、バラツキを考慮しようともしていない。断層モデルによる地震動過小評価についても「手法の違い」によると居直っている。ところが、前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏は任期切れ退職後の学会で、今の断層モデルのレシピでは地震動が過小評価されると批判している。福井地裁での大飯判決・高浜仮処分決定を受け、また、行政の立場から学者の立場に変わって、発言しやすくなつたのであろう。しかし、行政が最新の知見を無視し、保守的評価を怠っているとき、行政に追従するのではなく、「それは重大な瑕疵だ」と指摘する責任と勇気が求められているのではないだろうか。

(注1) 原発における重要施設の固有周期について

主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期は表6に示すとおり、0.18～0.47secである。また、表7のように、原子炉格納容器はPWRで0.214sec、BWRで0.444secとBWRのほうがやや大きいが、主要な機器・配管の固有周期は、PWRとBWRで大差はない、0.031～0.144secである。これより、排気筒など細長い構築物以外は、原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期は、0.03～0.5secの範囲にあり、原子力発電所の耐震性を評価する上では、この短周期側での評価が重要だと見える。

大飯・高浜・美浜原発についても、主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期は、表8に示すとおりであり、この範囲が重要であることがわかる。ただし、これらの固有周期は原子炉設置許可申請書等に記載された新設時のものであり、設計通りに施工され、腐食・減肉や応力腐食割れなどによるひび割れがないことが前提である。これらの老劣化現象が伴えば、当然、固有周期は変わる。

また、原子力発電所の大型機器や配管類は元々固有周期が長いのだが、サポートを多数設置することで無理矢理短周期にしているため、このサポートが地震動などで破断もしくはサポート機能喪失が起きると、固有周期は長くなる。固有周期が長くなると、地震動による応答（応答速度や応答加速度等）が大きくなり、一層破壊が進む。ひどい場合にはこの繰り返しが一挙に生じて、カタストロフィックに大破断もしくは大変形を起こし、安全機能が失われることになる。

さらに、大きな地震動では建屋・構築物が弾性限界を超えて変形するため「非線形効果」と呼ばれる現象が生じ、床応答スペクトルの特性が変わり、それに伴って施設の応答速度や応答加速度も変わる。